



UNIVERSIDAD DEL NORTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS DE MAESTRÍA

**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE EN EL DESGASTE DE
MICRO-HERRAMIENTAS PARA MICRO-MECANIZADO DE
MATERIALES BIOCOMPATIBLES**

Autor: Yenny Marcela Orozco Ocampo

Tutores: Jovanny Pacheco Bolívar
Jorge Bris Cabrera

Barranquilla, 13 de Agosto de 2012

**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CORTE EN EL DESGASTE DE
MICRO-HERRAMIENTAS PARA MICRO-MECANIZADO DE
MATERIALES BIOCOMPATIBLES**

Tesis de grado para optar al Título de Magíster en Ingeniería Mecánica

YENNY MARCELA OROZCO OCAMPO

DIRECTOR
JOVANNY PACHECO B., Ph.D.
Ingeniero Mecánico

CODIRECTOR
JORGE BRIS C., Ph.D.
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA
2012

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, Agosto 13 de 2012

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
INDICE DE FIGURAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE SIGLAS	11
AGRADECIMIENTOS.....	13
RESUMEN.....	14
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.3 OBJETIVOS	16
CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE MICRO-FABRICACIÓN	17
2.1 MINIATURIZACIÓN	17
2.2 MICROFABRICACIÓN.....	19
2.3 MICRO-MECANIZADO.....	22
2.3.1 Microfresado.....	23
2.3.2 Máquinas	25
2.3.3 Herramientas.....	27
2.3.4 Materiales	29
2.4 APLICACIÓN DE LAS MICRO-TECNOLOGÍAS.....	29
CAPÍTULO 3. MECANISMOS DE DESGASTE Y MODELOS PARA PREDICCIÓN DE FUERZAS EN MICROFRESADO	32
3.1 MECANISMOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTAS	32
3.1.1 Desgaste de herramientas en macro-escala	32
3.1.2 Desgaste de herramientas en micro-escala.....	34
3.1.3 Estudios realizados en el desgaste micro-herramientas y condiciones de corte.....	36
3.2 MODELOS PARA PREDICCIÓN DE FUERZAS EN MICROFRESADO ..	37
3.2.1 Modelos mecánicos	38
3.2.2 Modelos analíticos	38
3.2.3 Modelos numéricos	39

3.2.4 Estudios realizados con modelos de predicción de fuerzas de corte	40
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	42
4.1 DEFINICIONES DE PARÁMETROS DE CORTE Y EQUIPAMIENTO REQUERIDO	42
4.1.1 Tipo de prueba de corte	42
4.1.2 Programas para computador	45
4.1.3 Adquisición de datos	46
4.1.4 Equipamiento utilizado.....	47
4.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS.....	55
4.2.1 Diseño del experimento	55
4.2.2 Caracterización de herramientas a utilizar	57
4.2.3 Preparación de la pieza de trabajo	59
4.2.4 Montaje de los dispositivos.....	60
4.2.5 Desarrollo de los experimentos	63
4.3 INCERTIDUMBRE DEL PROCESO	70
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
5.1 FUERZAS DE CORTE EN EL MICROFRESADO.....	72
5.2 OBTENCIÓN DE LAS CONSTANTES ESPECÍFICAS DE CORTE	78
5.3 RUGOSIDAD EN EL PISO DE LAS RANURAS	83
5.4 FORMACIÓN DE REBABA DURANTE EL RANURADO	85
5.5 ANÁLISIS DE FRECUENCIA.....	88
5.6 VARIACIÓN DE R_e Y RADIO DE HERRAMIENTA	91
5.6.1 Variación de R_e	91
5.6.2 Variación del radio de herramienta	92
5.7 TENDENCIA DE FUERZAS DE CORTE SEGÚN a_p Y f_z	97
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	102
TRABAJOS FUTUROS.....	104
LISTA DE REFERENCIAS	105
APÉNDICES	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los procesos de acuerdo al nivel de precisión	19
Tabla 2. Relación de formas obtenidas Vs Técnicas micro-fabricación.....	20
Tabla 3. Mecanismos de desgaste de herramientas escala macro	33
Tabla 4. Mecanismos de desgaste de herramientas escala micro	35
Tabla 5. Estudios realizados en el tema de desgaste de micro-herramientas	36
Tabla 6. Estudios realizados con modelos de predicción de fuerzas de corte	40
Tabla 7. Factores y niveles para experimentación	43
Tabla 8. Descripción de las herramientas empleadas para las pruebas.....	44
Tabla 9. Programas de computador	45
Tabla 10. Parámetros para adquisición de datos.....	47
Tabla 11. Características del centro de micro-mecanizado Kern Evo	48
Tabla 12. Características del centro de mecanizado IK Mill	49
Tabla 13. Aleatorización de corridas para pruebas de corte	56
Tabla 14. Caracterización de micro-fresas nuevas.....	58
Tabla 15. FRMS máximo resultante por combinación.....	78
Tabla 16. Parámetros de entrada para el modelo de fuerzas	81
Tabla 17. Coeficientes de corte	81
Tabla 18. Diagrama de rebabas. Combinaciones con S 30 krpm y 45 krpm	86
Tabla 19. Diagrama de rebabas. Combinaciones con S 60 krpm y 75 krpm	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ley de Moore aplicada a los procesos de remoción de material	17
Figura 2. Representación esquemática de escala dimensional	18
Figura 3. Procesos de micro-fabricación.....	21
Figura 4. Retos y necesidades en la miniaturización	22
Figura 5. Aspectos comparativos entre micro y mecanizado convencional.....	24
Figura 6. Proceso de micro-fresado	25
Figura 7. Proceso de microfresado.	26
Figura 8. Micro-fresa con \square 100 μ m.....	27
Figura 9. Fabricación de micro-herramientas	28
Figura 10. Aplicaciones en automoción y transporte.	31
Figura 11. Aplicaciones en tecnologías de información y telecomunicaciones	31
Figura 12. Aplicaciones en salud y biotecnología	31
Figura 13. Fotos SEM de fresa diámetro 100 μ m.....	34
Figura 14. Diagrama del modelo del sistema visto como una caja negra	39
Figura 15. Modelación Numérica.....	40
Figura 16. Operación de ranurado.	42
Figura 17. Esquema micro-fres	44
Figura 18. Discos PMMA.....	45
Figura 19. Adquisición de datos en Labview	46
Figura 20. Centro de micro-mecanizado Kern Evo	48
Figura 21. Micro-fresador IK Mill	49
Figura 22. Equipos empleados para la medición de fuerzas de corte.....	51
Figura 23. Láser ControlNT.....	52
Figura 24. Equipos para inspección óptica.....	53
Figura 25. Sistema easyScan 2 FlexAFM®	54
Figura 26. Plu Neox® 3D optical profiler de Sensofar	54
Figura 27. Nomenclatura para identificación de pruebas	55
Figura 28. Imagen parcial del código de mecanizado	57
Figura 29. Imagen SEM del radio de filo.....	58
Figura 30. Medición del radio de filo Re	59
Figura 31. Planos preparación disco, incluyendo ranuras	60
Figura 32. Preparación del disco para ranuras y CAD del disco.....	60
Figura 33. Montaje disco – placa - dinamómetro	61
Figura 34. Montaje de equipos para pruebas de ranurado.	62
Figura 35. Montaje de equipos para pruebas de ranurado	63
Figura 36. Preparación del disco.	64
Figura 37. Alistamiento de equipos.....	64
Figura 38. Proceso de ranurado.....	65
Figura 39. Vista parcial lista de chequeo para experimentación.....	65
Figura 40. Base para herramientas	66
Figura 41. Inspección de discos y herramientas	67
Figura 42. Vista parcial lista de chequeo para inspección de herramientas	67

Figura 43. Vista parcial lista de chequeo para inspección de discos ranurados	68
Figura 44. Elementos para medición en AFM.....	69
Figura 45. Escaneo de la probeta mediante técnica de AFM.....	69
Figura 46. Conjunto herramienta - cono - boquilla.....	71
Figura 47. Orientación ejes coordenados para adquisición de datos	72
Figura 48. Señal de fuerza adquirida combinación ap160-fz10-S45.....	73
Figura 49. Medición de la profundidad de pasada.....	74
Figura 50. Gráficas del tratamiento realizado a la información capturada	75
Figura 51. RMS de fuerzas adquiridas combinación ap080-fz10-S45.	76
Figura 52. Orientación de las fuerzas de corte en la micro-herramienta	77
Figura 53. Gráfica: S Vs. FRMS máximo resultante	77
Figura 54. Geometría envolvente exterior de la herramienta cilíndrica	80
Figura 55. Fuerzas para dos vueltas de la herramienta.....	82
Figura 56. Medición de rugosidad.....	83
Figura 57. Rugosidad por combinación de parámetros	84
Figura 58. Gráfica: Rugosidad Vs. FRMS _x	85
Figura 59. FDT combinación ap160-fz05-S30.....	89
Figura 60. FDT combinación ap080-fz10-S30.....	89
Figura 61. FDT combinación ap160-fz10-S60.....	90
Figura 62. FDT combinación ap080-fz10-S60.....	90
Figura 63. Medición de R _e antes de mecanizar.....	91
Figura 64. Gráfica: Combinación parámetros Vs. Evolución de R _e	92
Figura 65. Fresa □ 0,2 μm empleada en combinación ap160-fz10-S45	93
Figura 66. Fresa □ 0,2 μm.....	94
Figura 67. Gráfica: Longitud recorrida Vs. Radio de herramienta.....	94
Figura 68. Gráfica: Longitud recorrida Vs. Radio de herramienta.....	95
Figura 69. Gráfica: Longitud Vs. FRMS _x . Combinación ap160-fz05-S30.....	96
Figura 70. Gráfica: Longitud Vs. FRMS _y . Combinación ap160-fz05-S75	96
Figura 71. Gráfica: Longitud Vs. FRMS _x - FRMS _y . C ap160-fz10-S60	97
Figura 72. Comportamiento FRMS Vs. a _p (30 krpm).....	98
Figura 73. Comportamiento FRMS Vs. a _p (45 krpm).....	99
Figura 74. Comportamiento FRMS Vs. a _p (60 krpm).....	100
Figura 75. Comportamiento FRMS Vs. a _p (75 krpm).....	101

LISTA DE SÍMBOLOS

a_e	profundidad de corte radial (μm)
a_p	profundidad de corte axial (μm)
ap000-fz00-S00	nomenclatura experimentos: ap(profundidad axial en μm)-fz(avance en $\mu\text{m}/\text{diente}$)-S(velocidad de giro en krpm)
B_j	incertidumbre combinada
db	diferencial de anchura de viruta
dS	diferencial de longitud de filo
F	avance lineal (mm/min)
F_t, F_r, F_a	fuerzas de corte que actúan sobre un elemento infinitesimal (tangencial, radial y axial)
F_x, F_y, F_z	componentes de la fuerza de corte, sistema de referencia general
f_z	avance por diente ($\mu\text{m}/\text{diente}$)
h	espesor de viruta teórico
ι_0	ángulo de hélice de la micro-herramienta ($^\circ$)
j	cada filo de la herramienta
k	ángulo de posición
K_{rc}, K_{tc}, K_{ac}	coeficientes específicos de cizalladura (N/mm^2)
K_{re}, K_{te}, K_{ae}	coeficientes específicos de fricción (N/mm)
MS/s	(del inglés <i>megasamples per second</i>)
M_x, M_z	momentos en X y Z
N	unidad de fuerza del sistema internacional (Newton)
pC/N	(del inglés <i>picocoulombs per newton</i>)
R	radio de herramienta
R_a	rugosidad superficial
R_e	radio del filo de corte
S	velocidad de giro de husillo (rpm ó r/min)

S_a	(del inglés <i>roughness average</i>)
S_m	(del inglés <i>mean value</i>)
S_p	(del inglés <i>highest value</i>)
S_v	(del inglés <i>lowest average</i>)
S_y	(del inglés <i>peak-valley height</i>)
s	segundos
V_c	velocidad de corte
z	número de dientes o filos de la herramienta
z	altura de un punto en el filo de la herramienta
\square	diámetro de herramienta (μm)
ϕ_j	posición angular de un filo
$(X,Y,Z)_d$	ejes coordenados dinamómetro

LISTA DE SIGLAS

2D, 3D	dos dimensiones, tres dimensiones
ADC	(del inglés <i>analog-to-digital converter</i>)
AE	emisión acústica (del inglés <i>Acoustic Emission</i>)
AFM	microscopio de fuerza atómica (del inglés <i>Atomic Force Microscope</i>)
APFI	(del inglés <i>Analog Programmable Function Interface Channels</i>)
ART2	teoría de resonancia adaptativa
BNC	(del inglés <i>Bayonet Neill-Concelman</i>)
CAD	diseño asistido por computador (del inglés <i>Computer Aided Desing</i>)
CAM	manufactura asistida por computador (del inglés <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CNC	control numérico computarizado (del inglés <i>Computerized Numerical Control</i>)
DIO	entrada / salida digital (del inglés <i>Digital Input / Output</i>)
ECM	(del inglés <i>Electrochemical Machining</i>)
EDM	(del inglés <i>Electrical Discharge Machining</i>)
FDT	(del inglés <i>Discrete Fourier Transform</i>)
FE	elementos finitos (del inglés <i>Finite Element</i>)
FIB	(del inglés <i>Focused Ion Beam</i>)
FRF	(del inglés <i>Frequency Response Function</i>)
FTS	(del ingles <i>Flexible Tooling Systems - with high precision for small parts manufacture</i>)
HRC	dureza Rockwell en escala C
krpm	Equivalente a 1×10^3 rpm
LBM	(del inglés <i>Laser Beam Machining</i>)
LIGA	litografía, electrodeposición, moldeo (siglas en alemán)
MDS	simulaciones de dinámica molecular (del inglés <i>Molecular Dynamics</i>)

Simulations)

MIM	(del inglés <i>Metal Injection Molding</i>)
MST	(del inglés <i>Microsystems Technology</i>)
MUCT	(del inglés <i>Minimum Uncut Chip Thickness</i>)
NCRL	(del inglés <i>Non-contact / Tapping™ mode – Long Cantilever – Reflex coating</i>)
PLA	(del inglés <i>polylactide</i>)
PMMA	polimetilmetracrilato
PS	dispersión de posición (del inglés <i>Positioning Scatter</i>)
RMS	(del inglés <i>root mean square</i>)
SEM	microscopio electrónico de barrido (del inglés <i>scanning electron microscope</i>)
SL	(<i>Stereolithography</i>)
SLO	sistema láser Off – line
SLRHU	sistema láser de reflexión de haz único
SMTHP	sistema de monitoreo de tensión herramienta – pieza
SWH	(del inglés <i>Smart Workpiece Holder</i>)
UR	unidad de remoción de material (del inglés <i>Small Unit Removal</i>)
USB	(del inglés <i>Universal Serial Bus</i>)
USM	(del inglés <i>Ultrasonic Machining</i>)
VI	instrumento virtual (del inglés <i>Virtual Instruments</i>)
WC	carburo de tungsteno
WEDG	(del inglés <i>Wire Electrodischarge Grinding</i>)

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se lo debo y entrego a Dios, con Él siempre estará mi gratitud eterna por los maravillosos regalos con los que día a día me bendice.

Le agradezco a mi amado esposo por su apoyo en lo personal y académico, su comprensión en los momentos más difíciles en el desarrollo de este trabajo y sobre todo por su amor incondicional. A mi hermosa madre, que siempre ha apostado por mi éxito en lo personal, académico y profesional, ¡ella me ha contagiado de su fe en mí! A mis abuelos que siempre me expresan y demuestran su amor.

A los ingenieros Jorge Bris y Heriberto Maury, quienes aún sin conocerme, confiaron en mí para el desarrollo del proyecto del cual se deriva esta investigación. Al ingeniero Jovanny Pacheco, mi director de tesis, compañero de proyecto y al que por mucho tiempo le hice la vida más complicada con mis constantes correos y preguntas: *¡mi más sincera gratitud!*

A los profesores y personal del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad del Norte, mil gracias porque de la mayoría he aprendido lecciones muy valiosas, por acogerme y hacerme sentir parte de la comunidad Uninorteña. A todos mis compañeros de postgrado, aunque unos más cercanos que otros, les agradezco por su amistad y apoyo: *Siempre los llevaré en mi corazón.*

Agradezco al doctor César Carriazo por abrirme las puertas de su clínica sin restricciones y al personal general del Centro Oftalmológico Carriazo por siempre tener una actitud tan amable.

Expreso mi gratitud al ingeniero Norberto López de Lacalle por compartir sus conocimientos, información y contactos para el desarrollo de este estudio. A Harkaitz, Iñigo, Amaia y Rafa de IK4-Ideko quienes se interesaron, involucraron y apoyaron mi trabajo. Sin su ayuda, no habría sido posible llevar este trabajo por buen rumbo hasta su culminación. Como siempre se los he expresado: *¡Mil y mil gracias!*

Al ingeniero Juan José Pavón y a Robinson Meco de la Universidad de Antioquia por su colaboración en las mediciones de rugosidad.

Este trabajo también se financia con recursos de “El Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas” Contrato RC - No. 275-2011.

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es determinar la influencia de los parámetros de corte sobre la vida útil de la herramienta y la calidad superficial de piezas fabricadas mediante la técnica micro-fresado de polímeros biocompatibles. En el marco de este trabajo se hace una detallada revisión del estado del arte de modelos para cálculo de fuerzas de corte, se establecen correlaciones entre los parámetros empleados para operaciones de ranurado, las fuerzas de corte y el desgaste generado en la micro-fresa, y finalmente se analiza la calidad superficial (rebabas y rugosidad) que ofrece cada combinación de variables de corte.

Para el desarrollo de este estudio se realizaron operaciones de ranurado, de las cuales se capturaron las fuerzas generadas durante el proceso para el cálculo posterior de los coeficientes de corte que identifican el par herramienta-material. Se hicieron análisis de frecuencias para verificar condición de corte estable. Así mismo, se analizaron las combinaciones de condiciones de corte mediante mediciones de rugosidad en el fondo de las ranuras. Se evaluó la cantidad y tamaño de rebaba generada en los bordes de las mismas y se realizó seguimiento a la evolución de radio de filo y diámetro de las micro-herramientas empleadas en la experimentación.

Para el cálculo de los coeficientes y predicción de fuerzas de corte se utilizó el modelo mecanístico o semi-empírico, en el que se establecen relaciones entre las micro-fresas de tungsteno con diámetro 200 μm empleadas para las operaciones de ranurado de PMMA biocompatible.

En el campo del micro-fresado se presentan varias dificultades en el área experimental, debido a las pequeñas magnitudes manejadas en los parámetros a controlar y la poca oferta de equipos específicos para el monitoreo del proceso y sus variables, en esta escala de trabajo. Adicionalmente, el reducido tamaño de los útiles de corte hace que su manipulación y control exijan extremo cuidado y precisión, respectivamente.

Como resultado de esta investigación, se establece la combinación de parámetros que ofrece la mejor calidad superficial en los implantes de PMMA biocompatible y los rangos de operación que deben evitarse. Se determinan relaciones entre las fuerzas de corte y la evolución del desgaste de la micro-fresa. Adicionalmente se proponen valores de acuerdo a la variación del diámetro del útil de corte en lo que su estado cambia a semi-usado y usado.

Se destaca que el aporte más relevante de este trabajo de tesis, es la determinación de un parámetro de cuantificación del nivel de desgaste de la herramienta en función de su diámetro. Dado que este último parámetro puede ser monitoreado en la máquina a través de un sistema de medición por láser, es posible incorporar al trabajo programado de la máquina el criterio de desgaste para realizar cambios automáticos de herramienta durante las operaciones de micro-fresado.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

Una fabricación efectiva de elementos médicos a micro-escala, mediante microfresado está precedida de estudios realizados sobre los efectos de las condiciones de corte en fuerzas, geometría, acabado superficial y formación de virutas. Esto debido a que la efectiva compatibilidad de los implantes con el cuerpo humano no solo depende de las propiedades físico-químicas del material, también requiere de superficies suaves y libres de rebaba [1] . La calidad de las piezas finales depende en gran medida de la condición de la herramienta y del control de sus dimensiones. Aunque el desgaste de las herramientas siempre se ha discutido en el contexto de las operaciones de mecanizado convencionales, en el micro-fresado debe considerarse el tamaño de las herramientas y redefinir las consideraciones de desgaste y sus efectos en la pieza fabricada [2].

Las fuerzas de corte en operaciones de mecanizado contienen una valiosa información sobre como se está produciendo el arranque de material. Una variación de la fuerza de corte es debida a una modificación de las condiciones de corte, y puede llevar asociado un empeoramiento de la calidad dimensional o del grado de acabado en la superficie de la pieza, así como un desgaste prematuro en la herramienta o incluso una rotura catastrófica de la misma [3]. La monitorización de fuerzas en procesos de mecanizado para la macro-escala ya se utiliza, permitiendo el diagnóstico del proceso en tiempo real y se utiliza como base de controles adaptativos de las condiciones de corte. Sin embargo, en el micro-mecanizado estos modelos aún no están completamente definidos y las fuerzas medidas con dinamómetros específicos difieren en un valor muy alto de las calculadas teóricamente, como muestran los estudios realizados por Tansel y Bao [2], [4].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aplicación de técnicas de microfresado para la fabricación de micro-componentes con fines médicos implica estudios sobre la influencia que presentan los parámetros de corte sobre la calidad de la pieza (precisión dimensional, cantidad de rebabas y acabado superficial). Esto se debe a que uno de los aspectos más importantes para la biocompatibilidad es la reducción de las rebabas generadas por el proceso. A diferencia del micro-mecanizado de metales, en el corte de polímeros se presentan fenómenos como la acumulación de viruta en el filo de la herramienta. Esto deteriora la calidad final de la pieza fabricada, propiciando en algunos casos la ruptura súbita de la micro-fresa, siendo un problema a resolver para garantizar la aplicación industrial de estos procesos.

Una de las formas más empleadas para la selección de los parámetros del proceso, es en función de las fuerzas de corte ya sean obtenidas de forma experimental o estimadas teóricamente. Con respecto a esta última técnica, hasta el momento no existe un modelo que estime de forma fiable las fuerzas generadas, pero es posible emplear métodos combinados. Por lo tanto se hace necesario determinar de forma experimental, la combinación de parámetros de corte que ofrecen una mejor calidad en los micro-componentes fabricados en polímeros biocompatibles. Adicionalmente, es necesario conocer qué sucede con la evolución del radio de filo y la rugosidad generada en la pieza, para establecer una medida del desgaste de la herramienta y relacionar este fenómeno a su vez con los niveles de fuerza generados durante el corte.

En este estudio, cualquier diferencia entre una herramienta nueva y una usada, será identificado como desgaste.

1.3 OBJETIVOS

General

Determinar los efectos de los parámetros de corte en la vida útil de la herramienta y calidad de la superficie generada durante el proceso de microfresado de polímeros biocompatibles.

Específicos

- Revisar estado del arte de modelos para el cálculo de fuerzas de corte existentes tanto para mecanizado convencional como para micro-mecanizado.
- Establecer la relación entre los parámetros de corte y el desgaste de herramientas de micro-fresado en el mecanizado de PMMA grado médico.
- Establecer la combinación de parámetros de corte que permita reducir el tamaño de las rebabas y mejorar el acabado superficial en micro-componentes fabricados en PMMA grado médico.
- Determinar la evolución del radio de filo para una combinación de velocidad de giro, avance y profundidad axial.
- Establecer la relación entre los niveles de la fuerza de corte y la evolución del desgaste en la herramienta.

CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE MICRO-FABRICACIÓN

2.1 MINIATURIZACIÓN

La reducción gradual del tamaño de las piezas y elementos inicialmente empleados en el campo de la electrónica se denomina *miniaturización* y está determinada por la *Ley de Moore*; los aspectos que hacen de esta tendencia cada vez más atractiva para el campo productivo se centran en la reducción de masas y tamaños, bajos costos de producción y consumo energético, menores costos con respecto al impacto ambiental y fácil eliminación [5].

La Ley de Moore se ha extendido a los procesos de fabricación industrial, incluyendo los de remoción de material. Esto ha implicado una redefinición en las escalas de precisión, el diseño de equipos capaces de fabricar micropartes con altas precisiones y dispositivos auxiliares para la inspección de las piezas fabricadas. En la Figura 1 se presenta la influencia de la Ley de Moore en los procesos de remoción de material.

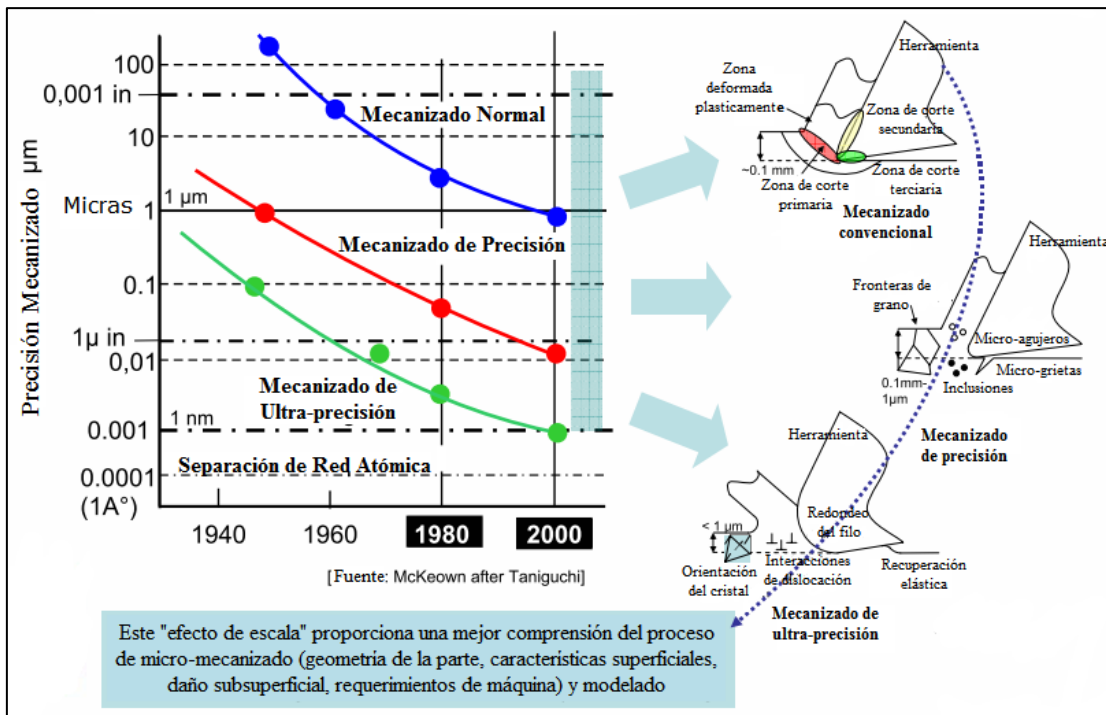


Figura 1. Ley de Moore aplicada a los procesos de remoción de material [6]

Escala dimensional

Con el surgimiento de técnicas que permiten la modelación y fabricación de productos de tamaño cada vez más pequeños y con márgenes de precisión estrechos,

la escala dimensional se ha reestructurado al igual que la escala de precisión aplicable a los parámetros de los procesos de fabricación. Esto implica que al referirse al término micro como “muy pequeño” el intervalo de 0,001 mm – 0,999 mm debe ajustarse al rango 0,001 mm – 0,500 mm [7], [8]. Se entiende entonces, que los productos con dimensiones finales de este tipo no pueden ser fabricados mediante técnicas convencionales. En la Figura 2 se presenta la escala dimensional bajo la cual se realizó esta investigación.

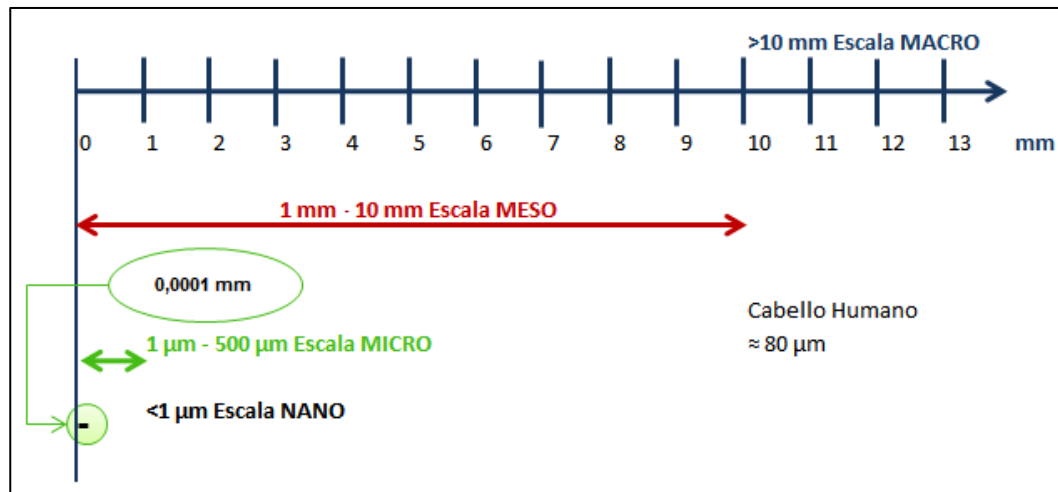


Figura 2. Representación esquemática de escala dimensional (no proporcional)

Escala de precisión

Otra de las implicaciones de la tendencia a la miniaturización es la necesidad de redefinir la escala de precisión. Entendiendo la precisión como el parámetro que establece la máxima calidad que se puede esperar en una pieza fabricada. Algunos autores resaltan la importancia de no limitar la definición de precisión a un único término en particular y proponen que debe expandirse hacia tres tipos de precisión como lo son micro-precisión, ultra-precisión y nano-precisión, ajustando de esta manera el concepto a los máximos grados de calidad posibles de lograr con los equipos y técnicas de fabricación actuales [9], [10]. Se requiere entonces, establecer valores medibles que permitan diferenciar los rangos de precisión mencionados y estandarizar la calidad de los productos ofrecidos en el mercado.

En la Tabla 1 se presentan los niveles de precisión adoptados para el desarrollo de esta investigación:

Tabla 1. Clasificación de los procesos de acuerdo al nivel de precisión en la pieza[10]

Nivel	Precisión (μm)
Micro Precisión	± 5
Ultra Precisión	$\pm 2,5$
Nano Precisión	≤ 1

2.2 MICROFABRICACIÓN

El término micro-fabricación es aplicable a la creación física de un producto, siempre y cuando al menos una de sus características funcionales en una dimensión esté dentro del orden de las micras (0,001 mm – 0,500 mm). Las técnicas que se han desarrollado para la fabricación de micropartes se denominan micro-tecnologías. Éstas se definen como la “tecnología para el desarrollo o fabricación de productos en el rango de las micras y cuya funcionalidad se debe precisamente a su tamaño...” [11].

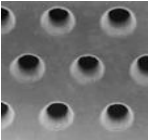

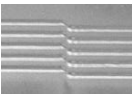
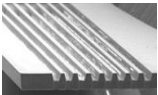
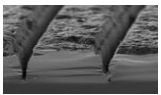
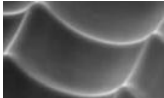

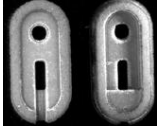


Una de las tecnologías más empleada y desarrollada es el micro-mecanizado; se puede entender como la actividad en la cual se remueve material para la producción de partes con dimensiones entre 1 μm – 999 μm . Los procesos mecánicos de micro-corte se caracterizan por la interacción mecánica entre herramienta y pieza, esto genera separación de material en forma de viruta. Por lo anterior la herramienta debe tener una dureza mayor a la del material a cortar; esto previene difusiones activadas térmicamente [7], [12]. Por otra parte, las ventajas que ofrece este tipo de procesos radican principalmente en la correlación geométrica que existe entre las trayectorias de los elementos de corte y la superficie generada en la pieza de trabajo.

Entre las técnicas convencionales de mecanizado que permiten su aplicación a escala micrométrica, y que han tenido un desarrollo notable en los últimos años, se pueden citar el microfresado, el micro-torneado y el micro-taladrado; entre las no convencionales se encuentran el mecanizado por rayos láser, por electroerosión, por ultrasonidos, por haz de iones y por haz de electrones [3]. Sin embargo esta transición en la escala dimensional y de precisión, implica la reducción del diámetro de la herramienta para obtener una unidad de remoción de material ó *UR* cada vez más pequeña; estudios recientes de MDS sugieren que la unidad de remoción en profundidad, puede ser hasta de 1 nm [13]. La *UR* también es definida por otros autores como espesor límite de corte o *MUCT* (*minimum uncut chip thickness*) [7], [14].

Las características de los equipos, herramientas y capacidad de producción hacen que cada tecnología sea apta para la fabricación de determinadas piezas. Esto hace que la

mayoría de micropartes para llegar a su forma y dimensión final requieran de más de una operación de fabricación. En la Tabla 2 se presenta una relación entre formas y procesos, incluyendo algunas limitaciones o particularidades.

Tabla 2. Relación de formas obtenidas Vs Técnicas micro-fabricación

FORMA	ELEMENTO	MICRO-TÉCNOLOGÍA	ESPECIFICACIONES
	Agujeros	USM Punzado Fotograbado LBM - LS LIGA -EDM Taladrado	Ø20 µm Producción en masa Usar película aislante para profundidad Ø100 µm con profundidad de 1 mm De formas circulares y rectangulares
	Pines	Pulido WEDG Torneado EDM	Agujeros poco profundos y cavidades estrechas De forma circular y cuadrada
	Surcos	Pulido Fresado LBM	Agujeros poco profundos y cavidades estrechas
	Ranuras	ECM - EDM Fresado LIGA WEDG LBM - MIM	Relación entre espesor y alto de pared baja
	Ranuras en V	LBM WEDG Fresado	
	Formas Cóncavas	LIGA Torneado WEDG Hot Embossing	
	Formas Convexas	WEDG Hot Embossing	
	Formas 3D	EDM - SL Fresado LIGA - LBM MIM	
	Formas 2D	EDM Fresado MIM	
	Herramientas	Pulido EDM - LBM Fresado	Fresas y brocas en Tungsteno

En la Figura 3 se presenta la relación entre materiales, calidad superficial, geometrías y dimensiones alcanzables con diferentes tecnologías de micro-fabricación. Esta gráfica también puede ser empleada para la selección de la técnica más apropiada de acuerdo a las características de la pieza a fabricar.

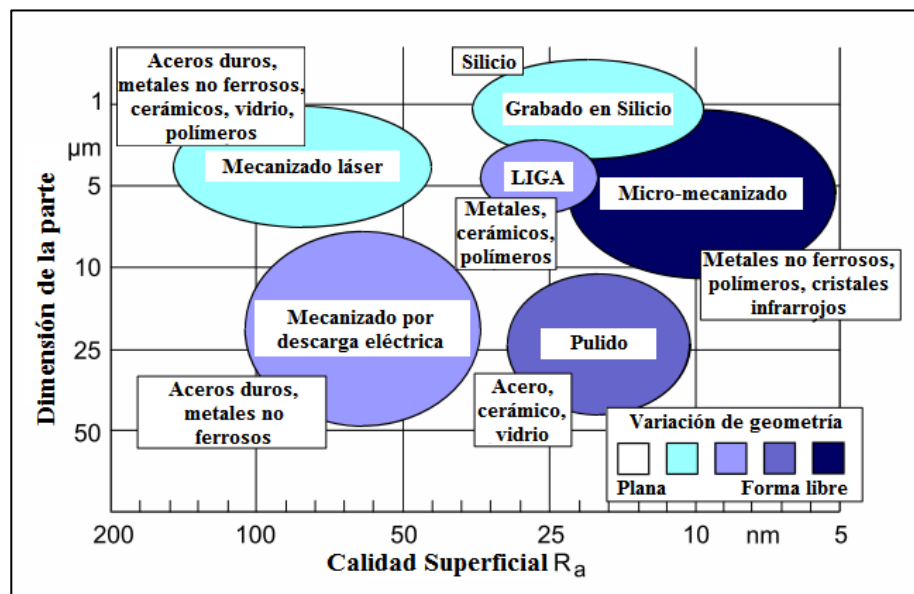


Figura 3. Procesos de micro-fabricación en relación a las dimensiones y calidad de superficie posibles de obtener en el producto fina [6]

Cada técnica de micro-fabricación ofrece ciertas ventajas sobre los procesos de fabricación convencionales (meso y macro escala), entre las que se tienen:

- Reducción de consumos de energía y materiales durante la fabricación.
- Ligereza y portabilidad de los dispositivos fabricados.
- Aplicaciones menos invasivas.
- Mejor relación costo/funcionalidad.
- Simplificación de sistemas.

A medida que la evolución de las tecnologías de micro-fabricación continúa y se extiende a todos los sectores productivos, el reto de adaptar y optimizar cada aspecto involucrado en el proceso de fabricación, se hace más exigente. En el siguiente diagrama (Figura 4) se exponen algunos de estos aspectos.

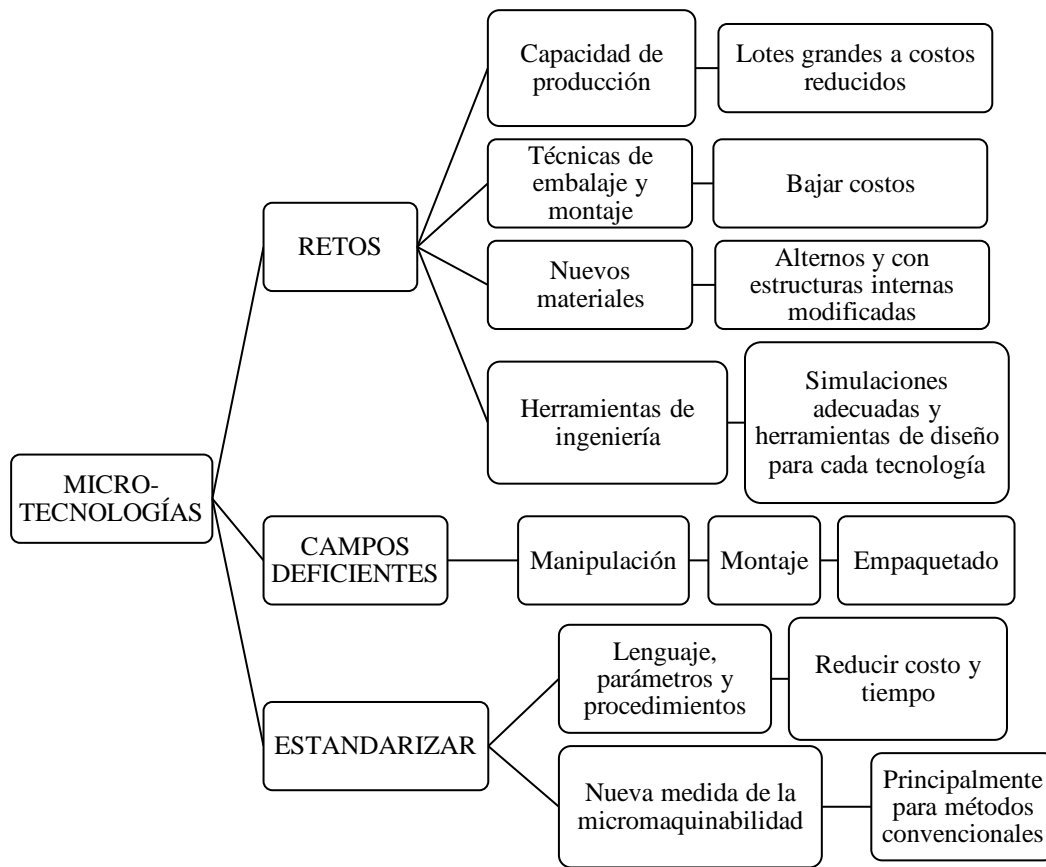


Figura 4. Retos y necesidades en la miniaturización [7], [15]

2.3 MICRO-MECANIZADO

Como se mencionó anteriormente, una de las técnicas de micro-fabricación más desarrollada y aplicada en la actualidad es el micro-mecanizado, puesto que es la tecnología más básica para la fabricación de partes y componentes miniaturizados [8]. Se diferencia de los otros procesos por que la remoción de material se hace en forma de viruta; un ejemplo claro de este fenómeno se observa en el micro-fresado donde el contacto entre la herramienta y la pieza genera la unidad de remoción de material.

La *UR* se entiende como la parte removida durante un ciclo de acción de remoción, esta unidad de proceso puede ser empleada para establecer la diferencia de fenómenos de remoción entre el mecanizado convencional y el micro-mecanizado [16]. Este parámetro puede ser expresado en términos de uno, dos o tres valores dimensionales, por ejemplo: longitud, área, volumen, sección transversal; uno de las reglas que se deben mantener en el micro-mecanizado es que la *UR* debe ser mucho más pequeña que la medida final del producto.

La mayoría de aspectos claves para lograr un proceso de micro-mecanizado exitoso están relacionados de una u otra forma con las micro-herramientas, mencionando algunos:

- Producción de micro-herramientas (relación aplicación – costo).
- Coordinación entre precisión y fabricación de la micro-herramienta.
- Sujeción tanto de la micro-herramienta como de la pieza de trabajo a la máquina empleada para el proceso de corte.
- Correcta elección de micro-herramienta (geometría - material) y proceso de micro-mecanizado.
- Antes de mecanizar un nuevo material se deben realizar pruebas detalladas de corte y producción para verificar los parámetros de corte óptimos [17] .

2.3.1 Microfresado

El microfresado se caracteriza por la interacción entre una herramienta afilada y el material a mecanizar, esto causa la fractura del material según la trayectoria definida y elimina el material inservible en forma de virutas [18]. En el micro-fresado se usan herramientas más pequeñas que las dimensiones finales de la pieza, llamadas micro-herramientas.

Este proceso ofrece mayor versatilidad en la geometría de los productos a fabricar. Es quizás una de las técnicas más prometedoras, debido a su aplicabilidad en cuanto a formas, materiales y posibilidad de generar geometrías 3D si se cuenta con el equipo y herramientas adecuadas. Es apto para lotes de producción medianos, ofrece precisiones finales del orden de pocas micras [19], [20].

Adicionalmente, posee una gran similitud con el fresado convencional (en operatividad) lo que hace su escalamiento menos traumático que en los casos de otras microtecnologías emergentes [21]. Cabe resaltar que los parámetros de corte reciben el mismo nombre que en la escala tradicional, es decir se mantienen los mismos conceptos de velocidad de giro de husillo, avance por diente, profundidades radial y axial, entre otros. En la Figura 5 se presenta un esquema comparativo entre las características más relevantes en el mecanizado convencional y su comportamiento al trabajar a microescala.

Característica	Micro-mecanizado	Mecanizado Convencional
<i>Proporción entre el avance por diente y el radio de la fresa</i>	Genera errores al predecir fuerzas de corte	Menor efecto
<i>Descenramiento de la punta de la herramienta</i>	Afecta la precisión	Menor efecto
<i>Falla repentina de la herramienta</i>	Mayor asociación con este proceso	Menor asociación
<i>Formación de espesor mínimo de viruta UR</i>	No siempre se forma, aunque exista contacto entre herramienta y pieza	Mientras haya contacto
<i>Deflexión de la herramienta</i>	Afecta la formación de viruta y la precisión	Menor efecto
<i>Efecto de tamaño y fuerzas en ambas superficies</i>	Más significativo	Menos significativo
<i>Desgaste de la herramienta a causa de los parámetros de corte y flujo de material</i>	Superficie resultante con rebabas y rugosidad altas	Menor probabilidad

Figura 5. Aspectos comparativos entre micro-mecanizado y mecanizado convencional

Entre los factores que influyen en el éxito del micro-fresado se encuentran: una excelente sujeción y correcta alineación de la pieza de trabajo; y desempeño de las micro-herramientas.

La sujeción debe seleccionarse de acuerdo a la dimensión y geometría de la pieza; los elementos más utilizados son bases congelantes, plastilina y cera de bloqueo, entre otros. Sin importar el método empleado debe asegurarse que la capa adicionada sea homogénea y lo más delgada posible (éste espesor deberá tomarse en cuenta para el establecimiento de ceros de la pieza). En algunas ocasiones se hace necesario realizar un planeado del material previo a la fabricación para asegurar una alineación precisa. El desempeño de la micro-herramienta radica en los parámetros de corte y la estrategia de mecanizado establecida [22]; por tal motivo es necesario hacer pruebas detalladas de corte y producción para determinar las variables de corte óptimas para el tipo de material a cortar y la geometría a fabricar [23].

En la Figura 6 se presenta un esquema generalizado del proceso de micro-fresado, de esta forma es posible establecer un proceso de fabricación adecuado para cada pieza proyectada según geometrías que la componen, dimensiones, operaciones y herramientas a emplear. Estos lineamientos se aplicaron en el desarrollo de esta investigación.

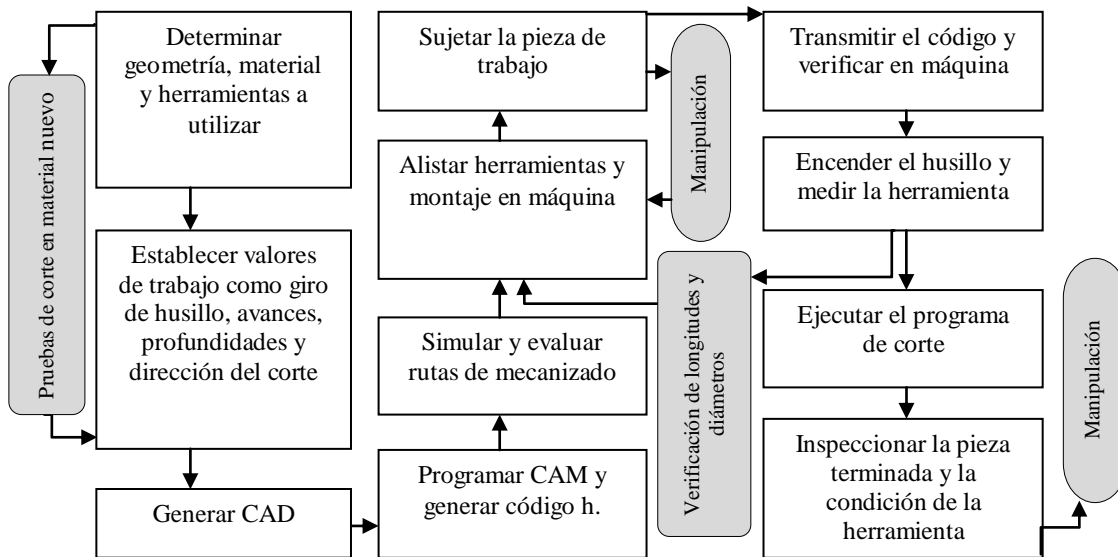


Figura 6. Proceso de micro-fresado

En esta técnica algunas de las dificultades que se presentan y de cierta manera impiden alcanzar la precisión exacta deseada, se traducen en la deformación de la pieza y de la herramienta, vibraciones, inexactitudes de la máquina, efectos de las fuerzas de mecanizado, límites de tamaños debido a deformaciones elásticas y sobre todo la fractura súbita de la herramienta que se suma a la imposibilidad de detectar instantáneamente este tipo de falla debido a las altas velocidades del husillo y al reducido tamaño de la herramienta. A medida que el tamaño de la herramienta disminuye, la rigidez también decrece, presentando grandes deflexiones al aplicar altas cargas de viruta [24], [25].

Los aspectos anteriormente mencionados han impulsado estudios referentes al desarrollo de modelos mecánicos (semi-empíricos) que describen el proceso de microcorte y sirven de herramienta para la determinación de fuerzas de corte y por lo tanto deflexiones en la herramienta; la mayoría enfocados en el mecanizado de metales duros, como el caso de los moldes [13].

2.3.2 Máquinas

El microfresado es una operación de corte que se realiza a alta velocidad ($\geq 30\,000$ rpm) por tal motivo la configuración de cada componente del equipo deben cumplir con características específicas.

Los equipos deben ser aptos para fabricaciones de ultra-precisión, con movimientos suaves y precisos, libre de vibraciones y con un husillo para trabajos a altas velocidades. El husillo debe ser estable para prevenir la expansión térmica, de esta

forma se minimizan vibraciones y saltos radiales de la herramienta. Para lograr esto, los cabezales están soportados en cojinetes aerostáticos o en rodamientos con bolas cerámicas, refrigerados continuamente y con potencias no muy elevadas [21]. Adicionalmente se requiere la utilización de un porta-herramientas que mantenga estos requerimientos. El 'run-out' deseado se encuentra por debajo de las 4 μm [8].

Es necesario que el equipo trabaje con un control numérico aplicable a la escala de trabajo (ver Figura 7) y que incorpore sistemas de monitoreo de las herramientas, sistemas de referencia de piezas y del proceso de como tal. En el caso de las herramientas, se pueden encontrar sistemas de medición por láser que compensan longitudes y diámetros de las herramientas de acuerdo a la temperatura del husillo. Para la toma de referencia de pieza, se emplean palpadores electrónicos asociados a funciones de la máquina; por último para el seguimiento, se adaptan cámaras de alta definición, microscopios o elementos que permitan enfocar y seguir el proceso en tiempo real.

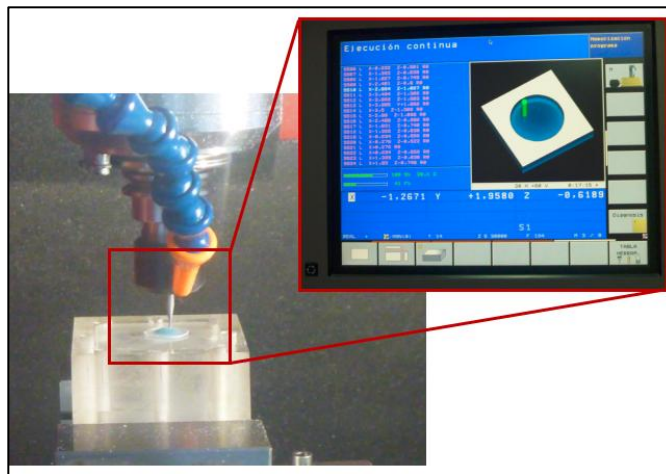


Figura 7. Proceso de microfresado. Se muestran: husillo de alta velocidad, porta-herramientas de alta-precisión, control numérico, simulación en tiempo real del proceso.

Los métodos de detección de rotura de herramienta que actualmente existen se pueden clasificar en dos grupos; los métodos directos y los indirectos. Los métodos directos se basan en la medición óptica mientras que los indirectos monitorizan las condiciones de herramienta por medio de parámetros asociados. La limitación en cuanto a accesibilidad del área de mecanizado conlleva una mayor predilección por los métodos indirectos tales como medición de fuerzas de corte, emisiones acústicas, vibración de la pieza/herramienta o variación de la intensidad del motor [26].

Para la selección de maquinaria, el criterio de precisión está determinado por el parámetro *PS* (*'positioning scatter'*) [10] o dispersión de posición que cada fabricante de equipos ofrece, este valor indica la precisión que permite obtener la máquina en las piezas fabricadas para cada posicionamiento de la herramienta y permite estratificar las máquinas en uno de los tres niveles de precisión. La precisión en el posicionamiento de ejes que se encuentra generalmente en los equipos del mercado es de $0,5\ \mu\text{m}$ y una resolución de posición de $0,1\ \mu\text{m}$. Para minimizar los efectos de la temperatura se acondicionan los recintos donde se realizan las operaciones [27].

En el capítulo 4, en las Tabla 11 y Tabla 12 se presentan las características ofrecidas por los equipos empleados para el desarrollo de esta investigación; éstos representan un estándar de las máquinas para micro-fresado que se encuentran en el mercado.

2.3.3 Herramientas

La geometría de las micro-herramientas se ha obtenido mediante el escalado de las de las existentes en escala macro, aunque su fabricación se ha convertido en un reto a medida que su tamaño se va reduciendo [28]. En el mercado actual es posible adquirir fresas con diámetros de $50\ \mu\text{m}$, generalmente poseen dos filos de corte. Es posible fabricar herramientas con dimensiones menores pero sacrificando la calidad geométrica, la precisión y la repetibilidad [21].

Para diámetros mayores a las $100\ \mu\text{m}$ se tiene una geometría de filos claramente definida, con una repetibilidad aceptable y unas tolerancias de $\pm 10\ \mu\text{m}$ (error geométrico + salto radial). Aún en el caso de un error real por debajo de $\pm 5\ \mu\text{m}$, la relación entre tolerancia y tamaño de herramienta es pobre en comparación con las fresas convencionales. En la Figura 8 se muestran micro-fresas con diámetros de $0,1\ \text{mm}$.

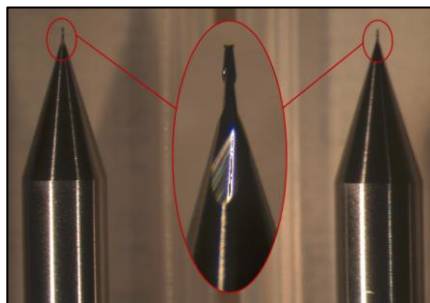


Figura 8. Micro-fresa con $\varnothing 100\ \mu\text{m}$

Generalmente los espigos de las micro-fresas son de $1,5\ \text{mm}$, $3\ \text{mm}$ y $1/8\ \text{in}$; esto es aproximadamente 20 veces superior al diámetro de corte de la herramienta. Debido al

cambio drástico de dimensiones es necesaria una transición suave entre espigo y longitud de corte, para evitar concentraciones de esfuerzos. Los radios de filo (R_e) deben estar en el orden de la dimensión del espesor de corte o menor, la importancia de este parámetro radica en que cuando se modifica por efectos de desgaste las prestaciones de corte se ven afectadas.

Las herramientas para uso general están hechas de carburo de tungsteno WC. Este material es un metal duro sinterizado con cobalto (6 % - 12 %). Además ofrece la posibilidad de obtener tamaños de grano entre $1\ \mu\text{m}$ – $0,5\ \mu\text{m}$ (micrograno – submicrograno); cuanto más pequeño es el grano el material es más duro y tenaz. Las fresas de este material se fabrican generalmente a partir de una barra de WC que se rectifica en máquinas especiales, hasta que se tallan los filos de corte. La ventaja principal que ofrece este tipo de herramientas es que están muy bien equilibradas y son aptas para altas velocidades de giro [29]. En la Figura 9 se ilustran los procesos de fabricación de fresas y brocas en carburo de tungsteno.

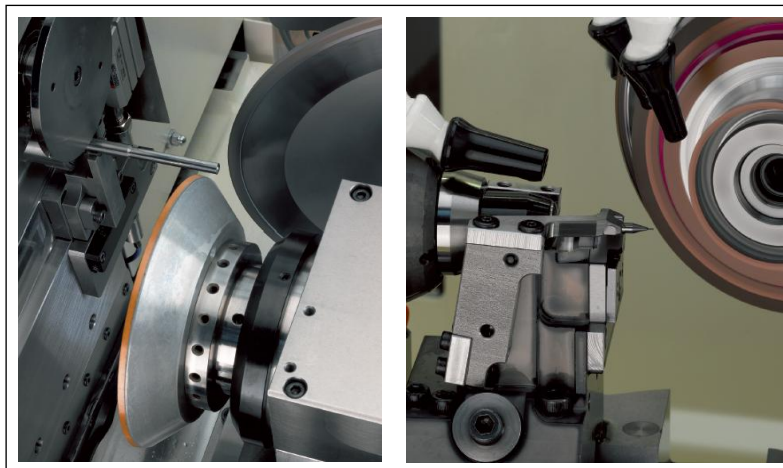


Figura 9. Fabricación de micro-herramientas de metal duro en un solo cuerpo.
Izquierda: broca. Derecha: fresa [30]

Otro de los materiales más empleado para la fabricación de micro-herramientas es el diamante monocristalino, pero debido a su alta afinidad química con materiales ferrosos presenta limitaciones en su campo de aplicación [13]. Para resolver estos inconvenientes se han desarrollado los diamantes sintéticos.

Aunque el uso de muelas de rectificado es la forma de fabricación de micro-fresas más común, existen otras técnicas en práctica y otras se encuentran bajo estudio. La fabricación de micro-fresas de sección transversal no circular se puede realizar mediante WEDM (*Wire Electro Discharge Machining*). Con las condiciones de descarga adecuada, el error geométrico de la herramienta y la redondez del radio de filo se mantienen por debajo de $1\ \mu\text{m}$. Es posible que con esta técnica se induzcan

algunas micro-asperezas en la superficie de la herramienta y que estas a su vez mejoren las propiedades tribológicas de la interfase herramienta – pieza [31].

Otro método para la fabricación de micro-herramientas se encuentra en la técnica FIB (*Focused Ion Beam Machining*) combinado con fresado de ultra-precisión controlado numéricamente. Con estas herramientas es posible obtener estructuras y geometrías que son consideradas inaccesibles por técnicas de remoción de material convencionales y que generalmente se fabrican mediante litografía profunda por rayos X [32].

2.3.4 Materiales

Una de las ventajas del micro-fresado es el amplio rango de materiales posibles de mecanizar. Es posible trabajar aceros de baja y alta dureza, inoxidable, aluminio, titanio, fundiciones de hierro y plásticos, entre otros.

En el fresado convencional la viruta está compuesta por varios granos del material, mientras que en el micro-fresado contiene de unos pocos a un grano de material. Por lo anterior es generalmente aceptado que un material con estructura refinada favorece las condiciones de corte, cuando se realiza a micro-escala. Al cortar simultáneamente varios granos se atenúan vibraciones originadas en los cambios cristalográficos; puesto que existe mayor margen para que ocurra la dislocación necesaria durante el corte [13]. De esta forma se produce el espesor de viruta mínimo requerido para separar el material y se evita el efecto de “bruñido” en el cual el material de la pieza es aplastado bajo la herramienta, alterando su comportamiento mecánico.

En resumen, el éxito en la fabricación radica en la correcta selección de la herramienta tanto en geometría como en material y los parámetros de corte. Pero también influyen las condiciones de la estructura cristalina de la materia prima, siendo las más relevantes el tamaño de grano y la homogeneidad.

El material objeto de estudio de esta investigación es el polimetilmetacrilato (PMMA) cumple con las condiciones de grano necesarias para permitir la generación del espesor mínimo de viruta, ya que la presentación en que se maneja está especificada para operaciones de micro-corte y por su grado médico es imprescindible que sus características mecánicas permanezcan invariables.

2.4 APLICACIÓN DE LAS MICRO-TECNOLOGÍAS

Siendo la “ciencia de la miniaturización” un campo en continua investigación y desarrollo, requiere de constante inversión pero a su vez representa cada vez más rentabilidad a los fabricantes debido a la demanda creciente para fabricar productos más pequeños, con tolerancias en el rango de las micras.

La producción de componentes a escala micrométrica inició en la industria electrónica y de computación, sin embargo la mayoría de procesos de fabricación se han adaptado para cumplir con las expectativas de la industria a esta escala. Actualmente se participa en áreas como [33]:

- Electrónica y computación: esta área de aplicación sigue constituyendo hoy en día el mayor mercado para las tecnologías de microfabricación, dominado principalmente por dos productos: los cabezales de discos duros y de impresoras de tinta. Otras aplicaciones son cabezales ópticos, monitores, proyectores, papel electrónico, giróscopos y conmutadores ópticos, entre otros.
- Sector automotor y transporte: su aplicación está enfocada a la solución de problemas relacionados con seguridad, calidad y fiabilidad. Actualmente, los productos comerciales en uso son de tipo MST y sistemas electrónicos miniaturizados. Se están desarrollando otras aplicaciones como nuevos tipos de pinturas, catalizadores y materiales.
- Tecnologías de información y telecomunicaciones: gracias a las aplicaciones desarrolladas, los seres humanos tienen la posibilidad de recibir, almacenar, procesar y transmitir grandes cantidades de información.
- Instrumentación y sensores: estos elementos hacen viable la detección y medida de parámetros físicos y químicos en ámbitos como el control de condiciones ambientales, automatización industrial, domótica, control y medida de producción industrial. Los principales sensores en el mercado son de presión, temperatura, aceleración, flujo y fuerza; dos tercios del mercado son cubiertos prácticamente por los de presión y temperatura.
- Medicina y biotecnología: para estas aplicaciones es necesario resolver simultáneamente problemas de miniaturización de dispositivos ya existentes, aumentar biocompatibilidad y funcionalidad. Entre los elementos que se encuentran en esta división se tienen los marcapasos cardíacos, sensores de glucosa, herramientas para cirugía, entre otros.

Como se puede apreciar en las siguientes imágenes (Figura 10 a Figura 12), los productos resultantes de la aplicación de diferentes técnicas de micro-fabricación tienen actualmente una alta participación en el mercado y una prometedora proyección de aumento en el mercado mundial. Esto ha impulsado diferentes estudios sobre los parámetros involucrados en los procesos de producción.

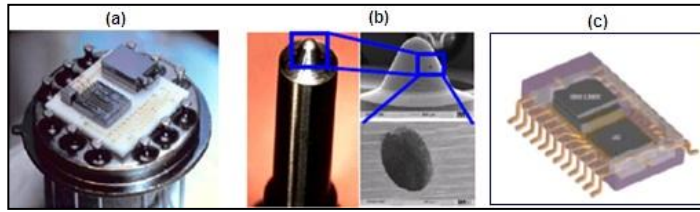


Figura 10. Aplicaciones en automoción y transporte. (a) acelerómetro MS7000 (b) válvula de inyección de diesel (c) micro-giróscopo [23]

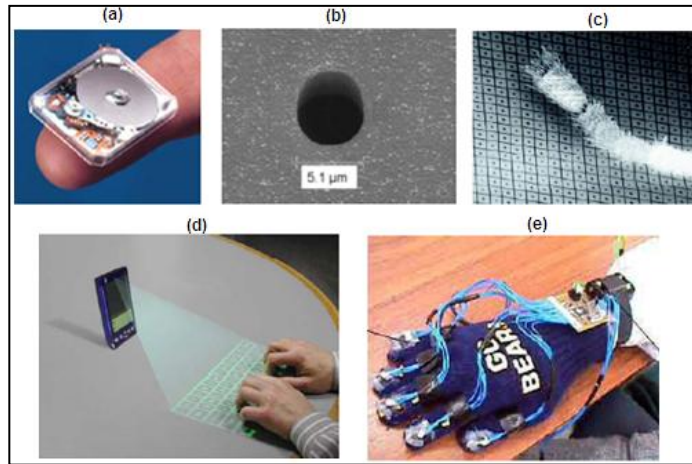


Figura 11. Aplicaciones en tecnologías de información y telecomunicaciones. (a) disco duro Toshiba de 0,85 in de tamaño, almacena hasta 4 GB (b) boquilla de diámetro 5 µm (c) micro-espejos en la superficie de una oblea de silicio para un proyector de imagen (d) teclado virtual (e) guante con sensores de aceleración [23]

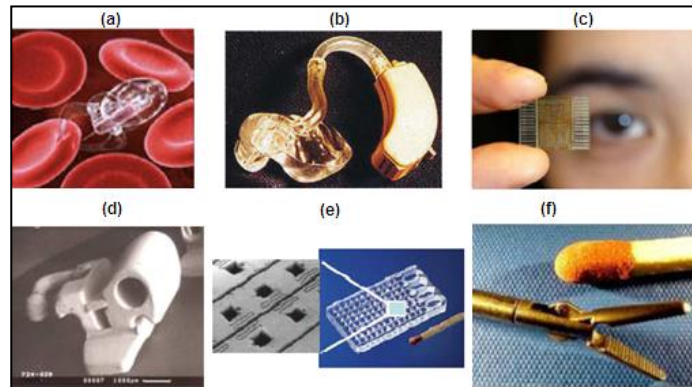


Figura 12. Aplicaciones en salud y biotecnología. (a) micro-robot guiado magnéticamente (b) dispositivo para audición (c) herramienta para recuento y separación de células (d) micro-piezas para implantes dentales (e) chip para sistema de diagnóstico micro-biológico (f) micro-pinza para cirugía [23]

CAPÍTULO 3. MECANISMOS DE DESGASTE Y MODELOS PARA PREDICCIÓN DE FUERZAS EN MICROFRESADO

Las operaciones de fresado convencional han sido estudiadas por más de 20 años. Se han realizado diversos estudios para modelar los mecanismos de corte [34–36], para estudiar las características de las fuerzas de corte [31], [37], [38] y detectar la falla de la herramienta. Las características de las fuerzas de corte en el micro-fresado son similares a las operaciones en la escala macro; sin embargo difieren en los mecanismos de desgaste y rotura. Por lo anterior, es necesario monitorear el desgaste de los útiles de corte para estimar el momento a partir del cual la herramienta no removerá material de tal forma que la pieza final tenga la calidad deseada [2].

En este capítulo se explican brevemente los mecanismos de desgaste y los modelos existentes para el análisis de fuerzas de corte. Adicionalmente, se presenta una revisión condensada sobre los estudios más significativos para esta investigación, realizados en el ámbito del desgaste de micro-herramientas y en la aplicación de modelos para predecir fuerzas de corte en micro-fresado.

3.1 MECANISMOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTAS

Estudiosos en el desgaste de herramientas en la escala micro, han indicado que la principal razón para operaciones de corte como el taladrado es la adhesión de viruta a la micro-herramienta [39], [14]. También han observado que las señales asociadas a las fuerzas de corte y vibraciones de la herramienta cambian ligeramente justo antes de la rotura; es por esto que la identificación de estas variaciones permite predecir de cierta forma el momento en el que la herramienta fallará [2].

3.1.1 Desgaste de herramientas en macro-escala

Las herramientas al momento de entrar en contacto con el material a cortar se encuentran sometidas a diferentes factores (fuerzas, vibraciones, temperatura, entre otros) que generan cambios de volumen en su geometría y puede terminar en la fractura de la herramienta o en un pobre acabado superficial en la pieza [11], [40].

Existen diferentes mecanismos de desgaste sobre los que influyen el material de la pieza y de la herramienta, además de las condiciones de corte [41]. La mayoría de las veces se presentan de forma simultánea durante el proceso de corte; es por esto que algunos investigadores han realizado ensayos con geometrías artificialmente desgastadas y poder estudiar el efecto sistemático de cada tipo de desgaste. Generalmente en este tipo de experimentos se registran las fuerzas de mecanizado y la rugosidad en la superficie y profundidad de la pieza. En la Tabla 3 se describen los mecanismos de desgaste más comunes.

Tabla 3. Mecanismos de desgaste de herramientas escala macro [41]

Mecanismo	Característica
Por abrasión	Este desgaste se da entre dos superficies que se rozan entre sí.
Por difusión	Proceso químico en el que la combinación de calor y presión en la zona de corte, producen un cráter en el filo de la herramienta.
Por oxidación	Proceso químico en el que la interacción herramienta-pieza produce desgaste en la arista del útil de corte.
Por fatiga	Las variaciones de temperatura y presión hacen que la herramienta se vuelva frágil.
Por adhesión	Material de la pieza se adhiere al filo de corte de la herramienta, de tal forma que cambia su geometría y fricción. Generalmente se presenta a bajas temperaturas y velocidades de corte.

Los modelos de desgaste establecidos hasta el momento se basan en dos criterios:

- a) Vida útil de la herramienta: que se puede expresar en función de variables de entrada como la velocidad de corte, el avance y la profundidad. Un ejemplo de este modelo es la ecuación de Taylor [11].
- b) Velocidad de desgaste de herramienta o pérdida de volumen por unidad de área de contacto por unidad de tiempo: la cual se expresa en función de variables de salida como la temperatura de la herramienta, la velocidad de deslizamiento, esfuerzos normales, esfuerzos cortantes [41].

Ambos criterios también toman en cuenta e incluyen en los modelos las constantes que dependen del material de la pieza y de la herramienta. Según Taylor [11], [29], la velocidad de desgaste es constante con respecto al tiempo y proporcional a la carga siempre que las condiciones químicas y metalúrgicas de la superficie no sean afectadas.

El contacto entre la herramienta y el material a cortar presenta diferentes tipos de desgaste en las herramientas, los cuales se conocen como de flanco, cráter, deformación plástica, desgaste de mella, fractura y formación de capa, entre otros [41]. La presencia de estos tipos de desgaste está influenciada por los parámetros de corte seleccionados para el proceso, los cuales a su vez influyen en el acabado superficial y tiempo de vida útil de la herramienta [42].

3.1.2 Desgaste de herramientas en micro-escala

A partir de la aparición del mecanizado a escala micro se han estudiado durante varios años las técnicas de fabricación de micro-partes, siendo el desgaste de las herramientas uno de los tópicos más importantes, ya que los efectos sobre la herramienta y por consiguiente la pieza son mucho mayores. Esta situación no es tan crítica en la escala macro, puesto que la diferencia fundamental entre el micro-mecanizado con relación al mecanizado convencional, radica en la escala de operación, a pesar de que cinemáticamente son iguales [7], [8], [43].

Esta reducción de escala afecta tanto a las piezas fabricadas como a las herramientas empleadas para el proceso de corte; en la actualidad se encuentran herramientas con diámetros hasta de 50 μm (fresas) y algunas más pequeñas pero con características especiales que las hacen más complejas y por lo tanto más costosas. Por lo que se hace relevante conocer y controlar los factores que afectan la precisión, tales como el descentramiento (*'run-out'*) de la herramienta, avance, velocidad, profundidad radial/axial y el tipo de recubrimiento apropiado con relación al material a cortar. Estos a su vez influyen en las fuerzas de corte y modo de falla de la herramienta.

Como se mencionó anteriormente las características de las fuerzas de corte en las operaciones de micro-mecanizado son casi las mismas que en el mecanizado convencional; sin embargo los mecanismos de desgaste y rotura de la herramienta son muy diferentes; mientras que en el segundo caso se produce un desgaste gradual de filos y presencia de cráteres, en el primer caso generalmente se presenta fractura en la longitud de corte. Estudios sobre el tema han permitido determinar que en la escala micro existe una relación entre el desgaste y la fuerza de corte, presentándose cambios en las vibraciones y picos de consumo justo antes de la rotura de la micro-herramienta. En la Figura 13 se presentan imágenes de micro-fresas en perfecto estado y fracturada.

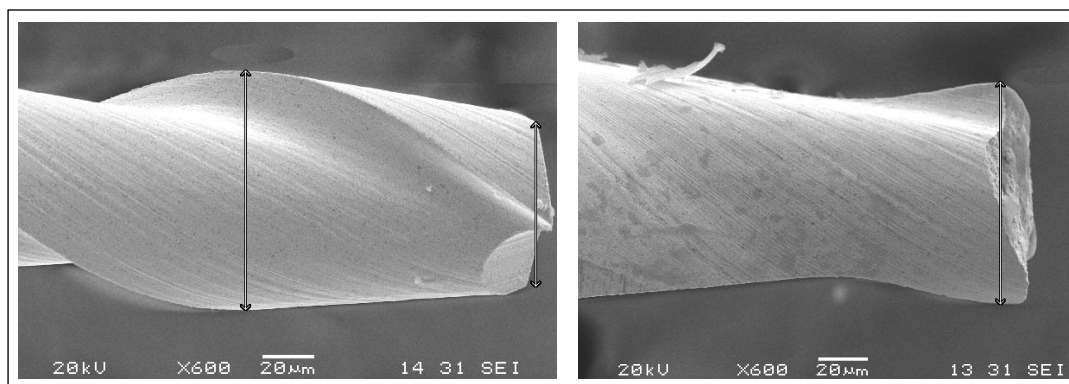


Figura 13. Fotos SEM de fresa diámetro 100 μm (600x). *Izquierda: nueva. Derecha: fracturada*

Una de las premisas que se ha logrado demostrar es que a altos avances por diente la vida de la herramienta se convierte en impredecible y corta; además se tiene la propuesta en estudio de que en el micro-fresado con una herramienta de dos filos se puede remover la viruta con una profundidad de corte pequeña siempre y cuando cada filo remueva material por solo media revolución [2]. En la Tabla 4 se presentan los mecanismos de desgaste asociados a rotura de las micro-herramientas.

Tabla 4. Mecanismos de desgaste de herramientas escala micro[2], [26]

Mecanismo	Característica
Obstrucción de viruta	Las fuerzas de corte se incrementan a medida que la viruta obstruye los filos de corte. Los esfuerzos sobrepasan el límite de endurencia y la rotura ocurre en pocas rotaciones.
Rotura por fatiga	Ocurre cuando las fuerzas y esfuerzos se incrementan como resultado del desgaste y permanecen por un largo periodo de tiempo. La herramienta está en rotación y por lo tanto la distribución de esfuerzos cambia, creando fatiga.
Excesiva tensión	Las fuerzas de corte se incrementan por dos razones: cuando el filo de corte pierde su forma original o cuando está parcialmente dañado y/o se presenta una capa de material adherido a este.

La falla en micro-herramientas es casi imposible de detectar de forma visual y sonora debido a sus reducidos tamaños y la alta velocidad de giro del husillo requerida para el micro-fresado. Se han empleado diferentes métodos con el propósito de determinar cómo varían las variables de corte y los parámetros de la máquina al momento de la rotura; pueden clasificarse como directos e indirectos.

- Métodos de detección de rotura directos: Sensores ópticos
- Métodos de detección de rotura indirectos: Medición de fuerzas de corte
 Emisiones acústicas
 Vibraciones pieza / herramienta
 Variación de consumo del motor

Para la implementación de estos métodos se han utilizado los siguientes sistemas [2], [26], [44], [45]:

- Sistema láser de reflexión de haz único (SLRHU)
- Sistema de monitoreo de tensión herramienta – pieza (SMTHP)
- Sistema láser Off – line (SLO)

La importancia de controlar tanto el desgaste como la rotura súbita de la herramienta en el micro-fresado radica en la necesidad de estandarizar la vida de las herramientas en los procesos de fabricación lo que está ligado directamente al costo. Además de obtener una calidad de superficie mecanizada óptima y una exactitud dimensional lo cual representa el aspecto fundamental en los procesos de micro-fabricación.

3.1.3 Estudios realizados en el desgaste micro-herramientas y condiciones de corte

En la Tabla 5 se presentan algunos de los estudios realizados sobre el tema de desgaste de herramientas, con enfoque en la escala micro.

Tabla 5. Estudios realizados en el tema de desgaste de micro-herramientas

Año	Autor	Estudio
1998	Tansel, et al [4]	Propone un procedimiento para la detección de fracturas de herramientas y para la estimación del desgaste mediante emisión acústica AE y teoría de resonancia adaptativa ART2.
1998	Tansel, et al [46]	Evaluación de un sistema SWH para monitorear las fuerzas de corte y reducir la tasa de remoción de material cuando se predice una posible falla. Se probó mecanizando acero y aluminio.
1998	Tansel, et al [2]	Estudio de los mecanismos de falla en micro-herramientas durante el mecanizado de aluminio, electrodos de grafito y acero. Identificación de fatiga y esfuerzos relacionados al tipo de falla. Monitoreo de fuerzas.
2004	Vogler, et al	Experimentación en diferentes materiales para estudiar la interacción entre las condiciones de corte y el ruido en la rugosidad superficial del piso de las ranuras.
2007	Filiz, et al	Investigación sobre la progresión del desgaste de una herramienta de carburo de tungsteno al mecanizar cobre. Encuentra que el desgaste es cinco veces más rápido cuando la relación entre el espesor límite de corte UR y el radio de filo Re se reduce.
2007	Liu, et al [47]	Estudio sobre la rugosidad superficial alcanzada en el micro-mecanizado de aleaciones de aluminio y acero al carbono. Determina que la rugosidad depende del espesor límite de viruta y el efecto del avance.
2007	Uriarte [21]	Análisis de la influencia del desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte para desarrollar de una metodología para la reducción de errores en el micro-fresado de moldes. Adaptación del modelo semi-empírico y variación de la sistemática para la obtención de los coeficientes específicos de corte.
2008	Lai, et al	Uso del gradiente de deformación plástica en modelos 2D con elementos finitos FE para simulación del corte ortogonal de aluminio y cobre. Predicción de gran incremento en la fuerza de

		corte específica cuando la relación entre el espesor límite de corte UR y el radio de filo Re se reduce.
2008	Filiz, et al [1]	Experimentación con herramientas hechas a medida mecanizando PMMA para ampliar la comprensión del efecto de las condiciones de corte sobre las fuerzas de micro-fresado, formación de rebabas y rugosidad superficial.
2009	Aramcharoen y Mativenga	Exploración experimental del efecto de la reducción de escala en las fuerzas de corte, acabado superficial y formación de viruta en el ranurado de acero H13, usando una herramienta con recubrimiento.
2010	Cardoso y Davim [28]	Optimización del micro-fresado mediante el estudio de rugosidad, condiciones de corte y estrategias de mecanizado.
2010	Shelton y Shin	Experimentación de micro-ranurado asistido por láser en materiales difíciles de mecanizar, tales como titanio y acero inoxidable, usando herramientas de carburo de tungsteno WC. Modelación numérica del efecto de escala en las fuerzas bajo condiciones de corte ortogonal.
2011	Ding, et al [48]	Evaluación experimental y modelado numérico del micro-fresado de acero H13. Investigación sobre la integridad superficial, control de dimensiones, efecto de la reducción de escala y progresión del desgaste de la herramienta.
2011	Ideko [49]	Mecanizado de barras de PMMA para determinar el desgaste de herramientas de diferentes diámetros, bajo ciertas condiciones de corte y con altas tasas de remoción.

3.2 MODELOS PARA PREDICCIÓN DE FUERZAS EN MICROFRESADO

Así como el proceso de mecanizado convencional se puede considerar un proceso electromecánico complejo, en el que las fuerzas y los momentos de torsión constituyen señales representativas de los procesos físicos que tienen lugar durante el corte. En la escala micro, el conocimiento preciso del comportamiento dinámico de estas señales permite evaluar cómo se está desarrollando el proceso de corte. De ahí, que sean de enorme utilidad en los sistemas de monitorización y control [50].

Una de las principales fuentes de error en el microfresado es la flexión producida en la herramienta como efecto de las fuerzas de corte. Estas fuerzas no presentan grandes magnitudes pero son considerables en comparación con la rigidez de la micro-herramienta y tiene gran influencia sobre el desgaste de las mismas. El cálculo de fuerzas de corte se ha convertido en un importante campo de investigación, hasta el momento se han encontrado tres aproximaciones, que ofrecen la posibilidad de modelar en cierta forma el fenómeno de corte. A continuación se presenta una breve descripción [21], [51], [52]:

3.2.1 Modelos mecanísticos

Estos modelos también son llamados semi-empíricos, usan un conjunto de relaciones entre distintas variables del proceso y las fuerzas generadas. Las relaciones se obtienen por experimentación y varían para cada operación, puesto que involucran características geométricas del proceso (material de la pieza, material y geometría de la herramienta).

Los modelos se basan en relaciones lineales entre las componentes de la fuerza de corte y el espesor de viruta instantáneo. Para operaciones de fresado, permiten predecir la fuerza de corte y su evolución durante el giro de la herramienta. En este tipo de operación no se tiene un espesor de viruta constante y la orientación varía a lo largo del filo de corte (efecto del ángulo de la hélice), por lo anterior generalmente se calculan las fuerzas totales instantáneas mediante la integración de las fuerzas en cada sección de filo en contacto con la pieza. Los coeficientes obtenidos en los experimentos caracterizan el conjunto herramienta – pieza, en lo relativo a la cizalladura (K_{tc} , K_{rc} , K_{ac}) y al rozamiento del material (K_{te} , K_{re} y K_{ae}). En el caso del fresado, los coeficientes específicos de corte con herramienta cilíndrica, son constantes. En el caso de usar una herramienta esférica, éstos valores cambian a lo largo del filo de corte debido al cambio en el ángulo de hélice y la velocidad de corte en cada punto de la herramienta [21].

Las constantes o coeficientes de corte (K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} , K_{te} , K_{re} y K_{ae}) se pueden obtener experimentalmente a partir de los esfuerzos de corte por diente, promediados para un tipo concreto de herramienta y material. Cabe señalar que estos coeficientes son muy dependientes de la localización (profundidad axial) del borde de corte [50].

En el apartado de resultados se expondrá y desarrollará este modelo de fuerzas.

3.2.2 Modelos analíticos

En este tipo de modelos se trata de relacionar matemáticamente los esfuerzos de corte para una operación de mecanizado con los fenómenos mecánicos que tienen lugar en la zona de corte, la geometría de la operación y las propiedades mecánicas de los materiales. En la Figura 14 se muestra el modelo empleado para la generación de los sistemas de ecuaciones.

Una de las teorías más reconocidas para corte ortogonal fue la desarrollada por Merchant en 1945 [53] y para corte oblicuo por Armarego en 1962 [54], éste último caso es el más cercano a la realidad de los procesos de mecanizado. Estos modelos se han ido refinando cada vez más, al incluir configuraciones geométricas de la herramienta y propiedades del material a mecanizar. Permiten a su vez determinar esfuerzos y deformaciones en la interfase pieza-herramienta.

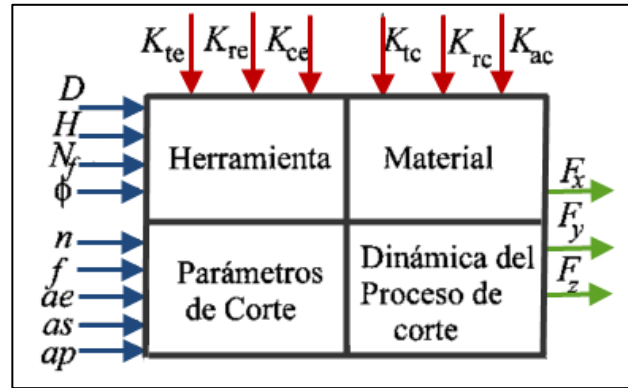


Figura 14. Diagrama del modelo del sistema visto como una caja negra [50]

Sin embargo, la precisión de estos modelos depende de la hipótesis adoptada para la distribución de esfuerzos en la materia prima. Así pues, surgen tres categorías para este modelo [21]:

- Modelos con plano de cizalladura: la deformación cortante ocurre en un plano ideal que separa la viruta del material de la pieza. Esta simplificación hace que el tratamiento matemático sea sencillo.
- Modelos con superficie curva de cizalladura: se introduce una superficie 2D y/o 3D para modelar las variaciones de velocidad de la viruta a lo largo de su sección. Son bastante complejos y se enfocan a la forma de la viruta.
- Modelos con zona de cizalladura: se considera una zona de deformación cortante con cierto espesor, para modelar el efecto del endurecimiento por deformación de la materia prima. Requiere de un manejo matemático complejo.

3.2.3 Modelos numéricos

La aplicación de estos modelos se enfoca en lo que acontece en la punta de la herramienta y en la zona de contacto pieza-herramienta y su interacción. Al basarse en la micro-mecánica de corte permite obtener distribución de esfuerzos, deformaciones y temperatura en la región de corte. Este tipo de modelos se emplean especialmente para optimizar las condiciones de corte y establecer la geometría del filo de corte de las herramientas [51], [55]. En la Figura 15 se presenta el esquema de modelación del proceso de corte mediante elementos finitos.

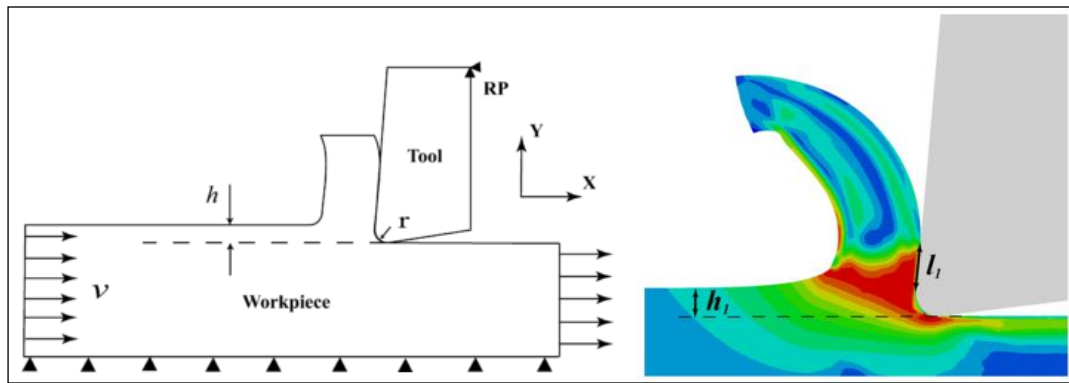


Figura 15. Modelación Numérica. *Izquierda:* modelo FE del proceso de micro-corte ortogonal. *Derecha:* predicción mediante modelo FE de la longitud de contacto (l) herramienta – viruta para un espesor límite de viruta (h) de 25 μm [55]

Estudios realizados con este tipo de modelos han permitido predecir efectos del radio de filo (propiedades termomecánicas), de la reducción de escala (gradiente de esfuerzo en microfresado) y modelar el proceso en diferente micro-estructura de un material [47]. Aunque tienen un alto costo computacional para operaciones complejas y en tres dimensiones; es posible implementarlos en el campo del micro-fresado.

Modelo empleado en el desarrollo de la investigación

El modelo empleado para esta investigación será del tipo mecánico con herramienta cilíndrica y no contempla efectos de “chatter”, heterogeneidad del material, vibraciones forzadas, entre otros. El principal objetivo de este trabajo es determinar el efecto de los parámetros de corte seleccionados sobre el desgaste de la herramienta al mecanizar material polimérico, biocompatible y con características específicas para microfresado. Para una micro-herramienta el aspecto más importante radica en determinar cómo las fuerzas generadas afectan la operación de corte; además de la relación que existe entre éstas y su desgaste.

3.2.4 Estudios realizados con modelos de predicción de fuerzas de corte

Algunos de los estudios realizados en el área de modelación de fuerzas de corte se presenten en la Tabla 6.

Tabla 6. Estudios realizados con modelos de predicción de fuerzas de corte [55]

Año	Autor	Estudio
1998	Waldorf, et al	Desarrollaron un campo de deslizamiento - línea para modelar las fuerzas de aplastamiento en torno al radio de filo.

2000	Tansel y Bao [56]	Proponen un nuevo modelo analítico para micro-fresado en el que se calculan las fuerzas de corte y el espesor de viruta, tomando en cuenta la trayectoria de la punta de la herramienta.
2003	Fang	Propuso un campo generalizado deslizamiento – línea para herramienta con radios de filo redondeados para predecir fuerzas cortantes y de bruñido.
2003	Lamikiz	Desarrollo de modelo mecanístico de cálculo de los esfuerzos de corte en operaciones de fresado con herramientas cilíndricas y tóricas.
2005	Gonzalo	Implantación del modelo de Lamikiz y Salgado en el software OPTITOOL.
2007	Wang y Jawahir	Modelaron el flujo de esfuerzos basados en las deformaciones promedio, tasa de deformación y temperatura en las zonas de corte.
2007*	Liu y Melkote [47]	Mostraron la influencia del radio de filo en el efecto de tamaño usando gradientes de plasticidad basados en modelos FE de corte ortogonal de aluminio.
2007*	Simoneau, et al	Incluyeron los efectos de la microestructura en el corte de acero 1045.
2007	Nasr, et al	Basado en modelos FE, simularon los efectos del radio de filo en los esfuerzos residuales durante el corte ortogonal de acero 316L.
2008	Bisaco, et al.	Incorpora la relación entre el espesor de corte límite y el radio de filo en un modelo de fuerzas de corte oblicuo.
2008*	Dhanorker y Özel	Desarrollaron un modelo FE para fresado en meso/micro-escala y para la predicción de la formación de viruta, temperatura y fuerzas de corte.
2009	Park y Malekian [54], [57]	Proponen un modelo de fuerzas mecanístico en el que se consideran regímenes de corte en cortante y bruñido debido al efecto del radio de filo.
2010*	Childs	Investigó el efecto de la reducción de escala y modeló las fuerzas de corte como una función del ángulo de corte, radio de filo y el espesor límite de corte.
2010*	Afazov, et al	Modelo las fuerzas de micro-fresado mediante simulación FE de corte ortogonal, incluyendo el efecto del espesor límite de corte, velocidad de corte y radio de filo.
2011*	Jin y Altintas [55], [58]	Incluyeron la dependencia de la temperatura en las variaciones de los esfuerzos en las zonas de corte en torno al radio de filo.

* Micro-corte

CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 DEFINICIONES DE PARÁMETROS DE CORTE Y EQUIPAMIENTO REQUERIDO

En este apartado se define todo lo concerniente a las pruebas experimentales. Se determina el tipo de prueba a realizar, las variables que se tomarán en cuenta como entrada y respuesta. Además se presentan características de los equipos, materiales y herramientas necesarias para el proceso.

4.1.1 Tipo de prueba de corte

Para el análisis de la influencia de los parámetros de corte en la vida útil de la micro-herramienta se emplearon pruebas de ranurado o *slotting milling*. En este tipo de corte la herramienta sigue trayectorias lineales de igual longitud con el propósito de generar cavidades de ancho igual al diámetro de la herramienta y obtener una profundidad constante en la longitud de la ranura generada, como se muestra en la Figura 16.

Para este tipo de prueba, el factor de fresado en oposición/concordancia ó *down/up milling* no se toma como variable, ya que en el proceso de ranurado, un lado de la pared será mecanizada en oposición y el otro en concordancia.

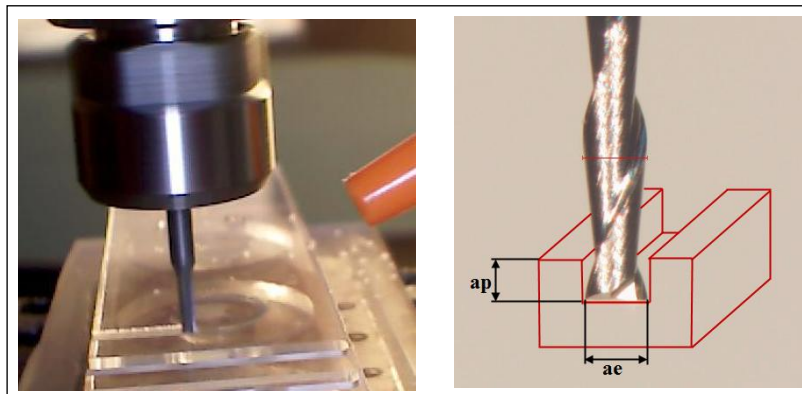


Figura 16. Operación de ranurado. *Izquierda:* operación real. *Derecha:* representación esquemática

Condiciones de corte

De acuerdo a la literatura presentada en los capítulos 2 y 3 en lo referente a pruebas de corte, las variables de mayor influencia en análisis de desgaste de herramientas en

Los niveles establecidos para la experimentación fueron determinados de acuerdo a las tablas de corte ofrecidas por los fabricantes de micro-herramientas para el mecanizado de plásticos. Los valores de trabajo se determinaron con base en las expresiones siguientes [30], [59]:

- A partir de la velocidad de corte (V_c) se calcula la velocidad del husillo,

Los valores obtenidos para las velocidades de husillo son elevados, por lo tanto se ajustan a los alcanzables por los equipos empleados para la realización de las pruebas de corte. Los valores definitivos para los niveles de la experimentación se muestran en la Tabla 7.

FACTORES	NIVELES			
	1	2	3	4
S (rpm)	30 000	45 000	60 000	75 000
a _p (μm)		80		160
f _z (μm/dientes)		5		10

En los ensayos de desgaste (cortando metales) usualmente se controla rugosidad en el fondo de la ranura y rebaba en aristas; sin embargo al mecanizar polímeros los procesos de inspección de estos aspectos suele ser complejo y en la mayoría de

ocasiones requiere de pruebas destructivas. Los criterios a considerar como variables cuantificables que determinarán la medida del desgaste de la herramienta estarán directamente relacionados con la cantidad de rebaba y la tolerancia de calidad en la geometría fabricada, se seleccionaron aquellos aspectos que permitan inspecciones de baja complejidad y que no impliquen daño en la pieza.

Partiendo de la premisa de que la rugosidad además de ser un factor de calidad, es una evidencia del desgaste de la herramienta. Su valor en el piso de las ranuras se controló mediante la aplicación de técnicas de AFM. La cantidad de rebaba generada se toma como una variable cualitativa, por lo que se capturaron imágenes de los perfiles generados para facilitar el análisis

En las herramientas se controló la evolución del desgaste del radio de filo, además se hizo seguimiento de las mediciones de diámetros captados por el láser del centro de micro-mecanizado. Cabe resaltar que para el mecanizado de polímeros no se espera una falla de la herramienta (fractura) pero si un desgaste gradual de la misma, que afecta la calidad de las piezas fabricadas. Adicionalmente, se capturaron las fuerzas generadas al mecanizar con diferentes combinaciones de parámetros de corte, de tal forma que sea posible establecer una relación entre sus valores y la condición final de la micro-herramienta.

Tipo de herramienta

Las herramientas empleadas para las pruebas de ranurado son fresas de Carburo de Tungsteno (WC), punta plana (*end mills*) y diámetro 200 μm (0,2 mm). Todas se clasificaron inicialmente como **nuevas**, puesto que no habían sido utilizadas para ningún tipo de operación de corte. En la Tabla 8 se muestran las características geométricas de la misma.

Tabla 8. Descripción de las herramientas empleadas para las pruebas [30], [59]

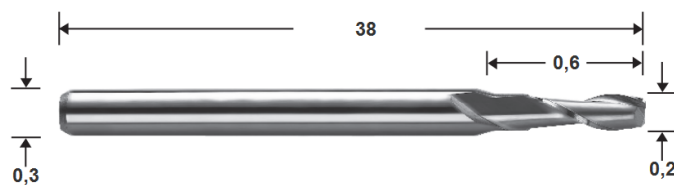


Figura 17. Esquema micro-fresa (dimensiones en mm)

- Fresa punta plana - Dos dientes
- Carburo de tungsteno
- Tolerancia en diámetro (+0/-0,002 mm)
- Construcción de un solo cuerpo

Las herramientas se inspeccionaron previamente para verificar su estado (comprobar que no estuvieran rotas) y para tomar las medidas iniciales del radio de filo.

Tipo de material a mecanizar

El material sobre el que se realizaron las ranuras para las pruebas de desgaste es polimetacrilato de metilo (PMMA) grado médico. Generalmente es duro y transparente; es el más conocido de los plásticos acrílicos pero por su pequeño volumen se ha convertido en un material de aplicaciones específicas [60]. El grado médico implica que al entrar en contacto con el cuerpo humano el nivel de contaminación que genera es muy bajo o casi nulo.

La presentación del PMMA utilizado es un disco con diámetro de 15 mm y espesor de 5 mm, como se muestra en la Figura 18 y en los planos presentados en la Figura 31.



Figura 18. Discos PMMA

4.1.2 Programas para computador

Para el desarrollo de las etapas de esta investigación se emplearon diversos programas especializados de computador, lo cuales se relacionan en la Tabla 9.

Tabla 9. Programas de computador

PROGRAMA	APLICACIÓN
SolidWorks® 2010	CAD de discos y ranuras
SolidCam® 2011	CAM de rutas de mecanizado para operación de ranurado
Post-Procesador V1.1	Aplicación asociada a SolidCam® para generar programa de mecanizado en código h (Heidenhain)
LabVIEW™ 2011	Entorno para adquisición de fuerzas de corte
Matlab® R2009b	Análisis de fuerzas de corte
Proscope HR™ software	Programa para adquisición de imágenes y videos con microscopio portátil
Tesa-Reflex® Vista 2.2	Programa para metrología de no-contacto y adquisición de imágenes en alta escala

El Post-Procesador V1.1 [61] fue desarrollado en la Universidad del Norte, específicamente para la generación de códigos para operaciones de corte en el centro de micro-mecanizado Kern Evo.

4.1.3 Adquisición de datos

Para la adquisición y registro de las fuerzas generadas durante la fabricación de las ranuras, se elaboró en una herramienta gráfica de programación (LabVIEW™) un instrumento virtual (VIs) que permite leer la información capturada por el dinamómetro, almacenar los datos transmitidos por el amplificador a la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y grabarlos en un archivo de texto.

El programa o VIs consta de dos entornos. El primero es el diagrama de bloques donde se colocan íconos y se conectan entre ellos; de esta forma se establecen las funciones a realizar, tales como: asignar variables y definir las características de la adquisición de la señal. El segundo es el panel frontal en este entorno el usuario interactúa con el programa cuando este se encuentra en ejecución, también se puede ver gráficamente la señal obtenida (curvas) y mediante controles (botones) se inicia o detiene el proceso de almacenamiento. En la Figura 19 se pueden apreciar los entornos creados para la investigación.

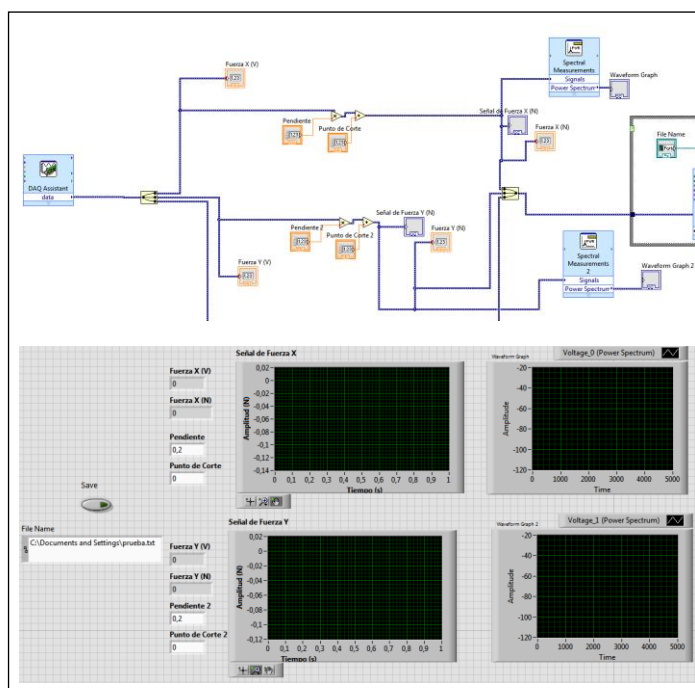


Figura 19. Adquisición de datos en Labview. *Arriba:* Programa en diagrama de bloques. *Abajo:* Interfaz del usuario

Para la optimización del modo y frecuencia de la adquisición de datos, se realizaron diferentes pruebas de ranurado, utilizando una herramienta de 300 μ m de diámetro. En cada ejecución del programa de corte se probaron diferentes modos de adquisición, frecuencia y cantidad de muestras. La selección de estas características estuvo limitada por software, capacidad de equipos y cantidad de datos requerida; un ejemplo claro es el formato del archivo donde se almacenan los datos capturados, para frecuencias cercanas a 80 kHz es posible guardar los datos en un archivo de texto (*.txt) pero en formatos de Excel® (*.xls) las filas disponibles en dicho programa no son suficientes para almacenar la cantidad de datos transmitidos por la DAQ al computador. Para frecuencias superiores se presenta saturación en la transmisión de información entre la tarjeta de adquisición y el computador.

La necesidad de adquirir información durante todo el proceso de ranurado exige que la adquisición de datos se realice en *Modo Continuo*, la velocidad de giro de la herramienta y el número de dientes de la herramienta implicados en el proceso de corte establecen que la tasa de muestreo sea alta. Adicionalmente se encontró que para un correcto funcionamiento del instrumento virtual y la tarjeta de adquisición de datos, el número de muestras “*Samples to read*” y la frecuencia “*Rate*” deben tener el mismo valor.

Los parámetros con los que se trabajará la adquisición de datos durante las pruebas de ranurado, se muestran en la Tabla 10:

Tabla 10. Parámetros para adquisición de datos

Amplificador VIs DAQ	3 canales	Rango:	2 N ^{1,2}
		Carga:	-10 pC/N ¹
		Mode:	Continuos ¹
		Samples to read:	75 k ¹
		Rate:	75 kHz ^{1,2}
		Timeout:	-1 ¹

1: Uninorte, 2: Ideko

Los registros generados se guardan automáticamente como archivos de texto (*.lvm), esto implica un procesamiento adicional de la información para convertirla en información con formato conocido por Matlab®.

4.1.4 Equipamiento utilizado

En este apartado se presentan los equipos empleados para el desarrollo de la investigación y sus características.

Equipos para pruebas de corte

Para las pruebas de ranurado se emplearon dos equipos de microcorte. Una de las máquinas es un centro de micro-mecanizado Kern Evo (ver tabla 9) perteneciente a la Universidad del Norte, en ésta se desarrollaron pruebas con los parámetros presentados en los niveles 1 y 2 de la tabla 5. El otro es un equipo de microfresado (ver tabla 10) que se encuentra y fue diseñado en el centro tecnológico especializado en tecnologías de fabricación y producción industrial IK4-Ideko y se empleó para la ejecución de las pruebas de corte en los niveles 3 y 4, las cuales implican alta velocidad de husillo.

Centro de micro-mecanizado Kern Evo

Posee características de ultra-precisión, su base de concreto polimérico absorbe vibraciones generadas por las altas aceleraciones y velocidades de avance que ofrece. Es versátil para la producción de formas, geometrías y para la fabricación de lotes en medias y altas producciones; además de la posibilidad de mecanizar un amplio rango de materiales [27]. En la Tabla 11 se listan características más importantes.

Tabla 11. Características del centro de micro-mecanizado Kern Evo

	<ul style="list-style-type: none">• Recorrido X/Y/Z 300/280/250 mm• Máximo peso de pieza (3 ejes) 50 kg• Tamaño máximo de pieza 70 mm x 70 mm x 100 mm• Velocidad máxima de husillo 50 000 r/min• Potencia del husillo 3,4 kW• Velocidad de avance 0,01 mm/min – 16 000 mm/min• Aceleración 8 m/s²• Resolución 0,1 µm• Calidad de superficie $Ra \leq 0,1 \mu m$• Dispersión de posición PS $\pm 0,5 \mu m$• Tolerancia de posicionamiento P $\pm 1,0 \mu m$• Precisión en pieza de trabajo (3 ejes) $\pm 2,0 \mu m$• Cambiador automático de herramienta para 95 posiciones• Medición automática de pieza mediante palpador Infrared mini M&H• Medición automática de longitud y radio de herramienta mediante sistema láser BLUM y controlador HEIDENHAIN
---	--

Figura 20. Centro de micro-mecanizado Kern Evo

Micro-fresadora IK Mill

Este equipo fue diseñado con tecnología basada en máquinas CMM adaptadas a micro-fresado. El eje X de la máquina se ha diseñado y fabricado para asegurar repetibilidad; los sistemas activos (motores, encoders y cojinetes aerostáticos) que requieren conducciones (eléctricas, señales o aire) se han colocado en la base. Adicionalmente la protección contra polvo y virutas se diseñó con base en laberintos [62]. Las características de este equipo se listan en la Tabla 12.

Tabla 12. Características del centro de mecanizado IK Mill

 A photograph of the IK Mill micro-machining machine. It is a compact, industrial-grade machine with a yellow protective enclosure and a black base. The base features the 'ideko' logo. A control panel with a screen and buttons is visible on the right side of the machine.	<ul style="list-style-type: none">• Recorrido X/Y/Z 270/410/200 mm• Repetibilidad $\pm 0,5 \mu\text{m}$• Resolución 1 nm – 20 nm• Precisión $\pm 0,5 \mu\text{m}$• Aceleración en X: 5 m/s^2• Aceleración en Y, Z: 2 m/s^2• Avance máximo: 7,5 m/min• Configuración: husillo vertical• Arquitectura: Bridge• Material: piedra natural (ejes X, Y), cerámico/metal (eje Z)• Actuadores: motores lineales• Posicionamiento: encoders lineales• CNC: FAGOR 8070• Husillo: motor eléctrico con rodamientos cerámicos• Rango husillo: hasta 120 000 r/min• Interfaz de herramienta: manual• Refrigeración herramienta: MQL• Medición automática de longitud y radio de herramienta mediante sistema láser• Cerramiento: total, categoría CE• Fijación de pieza: sistema de alta precisión• Tecnología de guías: rodamientos aerostáticos
---	---

Figura 21. Micro-fresadora IK Mill

Equipos para adquisición de datos

La adquisición de fuerzas se realizó en ambas instituciones (Uninorte, Ideko) con equipos de igual característica (dinamómetro); sin embargo los dispositivos de comunicación entre éste y el computador que almacena la información difieren tanto en programación como en equipos. En la Figura 22 se muestran los equipos

empleados durante las pruebas realizadas en la máquina Kern y el dinamómetro empleados en ambos equipos.

Dinamómetro: Kistler MiniDyn™

Este equipo proporciona la capacidad para medir los componentes de las fuerzas de corte y en algunos casos torques en un sistema coordinado dado. Es una herramienta útil por su gran aplicabilidad en investigaciones de ingeniería.

Para las etapas de pruebas de media y alta velocidad, se empleó un dinamómetro Kistler 9256C1 (80 cm x 75 cm), con capacidad para medir hasta 250 N en las tres direcciones X, Y, Z. También tiene capacidad de medir momentos de hasta 8 N·m en el plano de la placa y en uno de los planos perpendiculares (Mx y Mz). En todos sus ejes presenta una frecuencia de resonancia de entre 5,1 kHz - 5,6kHz [63].

Para el proceso de corte realizado en la máquina Kern se requirió adicionalmente de un cable apantallado de interconexión entre el dinamómetro y el amplificador.

Amplificador multicanal: para mediciones de fuerza 5080A

El objetivo de este equipo es convertir la impedancia de salida extremadamente alta del dinamómetro a un valor bajo, adaptado para transmitir la señal de vibración a través de cables a otros instrumentos que van a procesar la señal. Permitir ajustar parámetros como sensibilidad y rango, lo hace apto para medir esfuerzos como los presentes en procesos de micro-mecanizado.

Posee una respuesta en frecuencia desde 0 hasta más de 200 kHz, rango de medida de ± 2 pC - 2,2 millones pC, deriva reducida, bajo nivel de ruido, filtros paso-bajo avanzados, así como un módulo calculador de componentes de fuerzas y momentos integrado, de forma estándar [64].

Para el proceso de corte realizado en la máquina Kern se configuraron tres canales para medición exclusiva de fuerzas (Fx, Fy, Fz).

Tarjeta de adquisición de datos: DAQ NI USB-6259 BNC

La tarjeta de adquisición de datos actúa como interfaz entre una computadora y señales del exterior. Básicamente es un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una computadora pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Es un módulo de adquisición de datos optimizado para una precisión superior a velocidades de muestreo más altas (1,25 MS/s y 52 μ V), como en el caso del

microfresado. Posee 16 entradas analógicas, 4 salidas analógicas, 8 DIO, 2 APFI y 2 terminales BNC definidas por el usuario [65] .



Figura 22. Equipos empleados para la medición de fuerzas de corte: MiniDyn™, amplificador 5080A y tarjeta 9259

Para las pruebas realizadas en la máquina Kern se emplearon tres entradas analógicas, correspondientes a las fuerzas de corte en los tres ejes. Es importante resaltar que para las pruebas de corte realizadas en Ideko no se usó una tarjeta de adquisición como la descrita anteriormente. Se utilizaron equipos de adquisición integrados, concretamente un sistema PULSE LAN-XI.

Sistema de medición por laser: BLUM

Es un dispositivo de medición óptica precisa, se realiza de forma automática y dentro del área de trabajo del centro de mecanizado. Al medir la herramienta (radio y longitud) bajo condiciones de operación, permite compensar las dilataciones de la herramienta a causa de la temperatura del husillo, controlar cambios geométricos en la herramienta y detectar la ruptura de la misma [27], [66]. Este equipo se muestra en la Figura 23.

Para su activación es necesario ejecutar ciclos de control durante el proceso de corte; es decir, incluir dentro del programa líneas de código que lleven la herramienta hasta

la ubicación del laser. La principal ventaja de este sistema radica en ser de no-contacto, puesto que el registro se realiza mediante la interrupción que la herramienta hace al haz de luz, la cual es traducida por el sistema en medidas precisas de longitud y radio; adicionalmente el tiempo empleado en el proceso es mínimo [67].



Figura 23. Láser ControlNT

Equipos para inspección

A continuación se describen los equipos que se emplearon para la verificación on-line del proceso de ranurado y la inspección off-line de los discos ranurados y las micro-herramientas. En la Figura 24 se muestran imágenes de los dispositivos utilizados.

Microscopio portátil: ProScopeHR2™

Este microscopio al ser compacto y portátil permite su ubicación dentro de la máquina sin mayor complejidad en su montaje y sin afectar su operación. Permite trabajar con lentes desde 1 – 10x hasta 400x y debido a que permite capturar imágenes y videos, se empleó específicamente para el seguimiento de los procesos de ranurado.

Microscopio de mesa: Tesa Visio® 200 GL

Es una máquina de visión de fácil integración en los espacios de trabajo. Está dotada de una cámara a color, mesa XY de alta precisión y diferentes iluminaciones (anular, diascópica y segmentada) [68]. Posee aumentos de 40x a 140x con la posibilidad de adaptar lentes que reduzcan o amplíen la imagen de acuerdo a lo solicitado (0,5x y 2x). Para la operación de este equipo se requiere del programa Tesa-Reflex Vista con el cual se realizan ajustes de iluminación, enfoque y se desarrollan actividades de medición, programación y comparación de los elementos inspeccionados.

Este equipo se empleó para la medición off-line de los radios de filo de las micro-herramientas antes y después del mecanizado y para la inspección de las ranuras fabricadas.

Microscopio de barrido electrónico: SEM JSM-5600

Este equipo bombardea la superficie del elemento a inspeccionar con un haz fino de electrones acelerados, se recogen los electrones secundarios y los retro-dispersados. Es una herramienta que permite obtener imágenes con aumentos desde 100x hasta 200 000x [21].

Este equipo se empleó para verificar el estado de las micro-herramientas antes y después del mecanizado y para tomar un valor inicial aproximado del radio de filo.



Figura 24. Equipos para inspección óptica. *Izquierda:* ProScopeHR2™. *Centro:* Tesa Visio® 200 GL. *Derecha:* SEM

Equipo de AFM

El microscopio de fuerza atómica o AFM, también es conocido como SPM o microscopía de sonda, es una técnica de imágenes de alta resolución para detalles tan pequeños como una red atómica. Permite observar y manipular características a nivel molecular y atómico. Además puede ser utilizado para obtener imágenes de cualquier superficie conductora o no; proporcionando información de alta resolución y con características tridimensionales en el espacio real [69].

Para la realización de este tipo de pruebas, una pequeña punta sondea la superficie de la muestra a una distancia tan corta que actúan fuerzas atómicas. La punta se encuentra adherida al final de una lámina en cantiliver, de tal forma que la fuerza que actúa sobre la punta se determina mediante la deflexión del sistema en voladizo [70]. En la Figura 25 se muestra el equipo empleado para las mediciones de rugosidad en el suelo de las ranuras.



Figura 25. Sistema easyScan 2 FlexAFM® [70]

Equipo para adquisición de R_a , R_c y rebabas usado en Ideko: Plu Neox®

Este equipo cuenta con tecnología 3D optical profiler de no-contacto, permite obtener topografías mediante técnicas de escaneado confocal e interferometría. También puede funcionar como microscopio de campo claro u oscuro. Posee un rango de medición desde 0,1 nm [71].

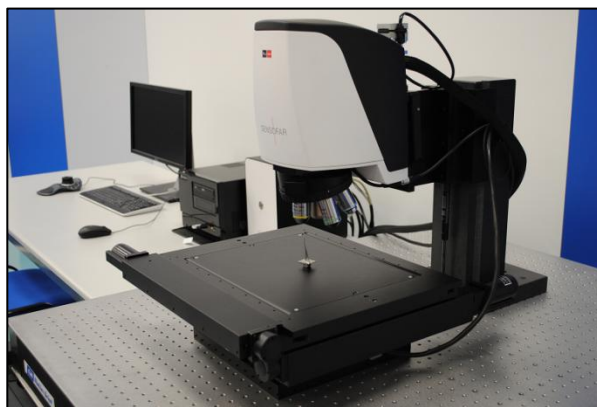


Figura 26. Plu Neox® 3D optical profiler de Sensofar

Con el equipo mostrado en la Figura 26 se realizaron mediante el uso del escaneado confocal, las mediciones de los radios de filo y la rugosidad en el piso de las ranuras.

Las imágenes de las ranuras y rebabas se obtuvieron usando el modo de microscopía de campo claro.

4.2 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

En este apartado se presentan los lineamientos establecidos para las etapas operativas de la investigación; tales como diseño del experimento, preparación del disco y montaje de los dispositivos, entre otros.

Para las rutinas de mecanizado de ranuras e inspección de herramientas y discos se crearon protocolos de acciones, de tal manera que se asegure la repetibilidad en todos los procesos (por parte del operario).

4.2.1 Diseño del experimento

Para investigar los efectos de la velocidad, el avance y la profundidad en el desgaste de la micro-herramienta de 200 μm , se realizaron dos diseños de experimentos. Cada experimento se convierte por lo tanto en un 2^3 con dos velocidades de giro de husillo, dos avances y dos profundidades axiales.

De acuerdo a los factores y niveles determinados para la realización del experimento (ver Tabla 7) y teniendo en cuenta las características ofrecidas por los centros de micro-mecanizado (velocidades de husillo) Kern e IK Mill, las pruebas de corte se dividieron en dos partes. En la Universidad del Norte se realizaron las pruebas correspondientes a los niveles de velocidad de giro 1 y 2, mientras que Ideko realizó las correspondientes a los niveles 3 y 4. También se estableció una nomenclatura para identificar de forma fácil y rápida los mecanizados realizados, probetas y micro-herramientas utilizadas. La nomenclatura adoptada se muestra en la Figura 27.

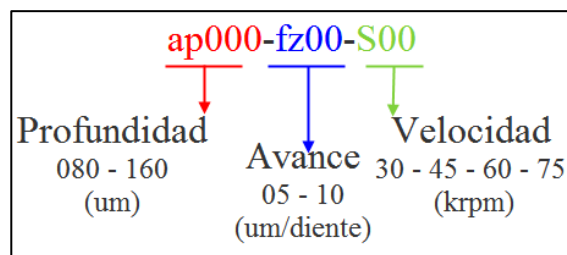


Figura 27. Nomenclatura para identificación de pruebas

El valor de máximo para la velocidad del husillo está limitado por las FRF (*Frequency Response Function*) del dinamómetro; a pesar de que el centro de mecanizado de Ideko alcanza velocidades de hasta 120 000 rpm, al usar una

velocidad de cabezal por encima de aproximadamente 90 000 rpm, el comportamiento dinámico del dinamómetro “falsea” las mediciones de fuerza. Para corregir estas desviaciones se deben tratar las señales de fuerzas capturadas en los ensayos de corte, mediante procedimientos de elevada complejidad [72].

Inicialmente se determinó un orden de experimentación (aleatorio) para la realización de las operaciones de ranurado, como se muestra en la Tabla 13. Para la generación de los códigos de mecanizado, se transformó el parámetro de avance por diente f_z , en un avance lineal F ; también denominado avance de la máquina y siendo el más empleado en los talleres [17]. Para la conversión se empleó la ecuación 4. Para mayor claridad en la tabla se muestran tanto los valores de f_z como de F correspondientes a cada corrida de experimental.

Ecuación 4

En el mecanizado de cada probeta, la herramienta recorrió 1 300 mm linealmente. El volumen de material removido dependió de la profundidad axial de corte, de tal manera que para el a_p de 80 μm se removieron 20,8 mm^3 y 41,6 mm^3 para 160 μm .

Tabla 13. Aleatorización de corridas para pruebas de corte

Corrida experimental	a_p (mm)	f_z ($\mu\text{m}/\text{dientes}$)	F (mm/min)	S (rpm)
ap160-fz05-S45	0,160	5	225	45 000
ap080-fz05-S30	0,080	5	150	30 000
ap160-fz10-S30	0,160	10	300	30 000
ap160-fz10-S45	0,160	10	450	45 000
ap080-fz10-S45	0,080	10	450	45 000
ap160-fz05-S30	0,160	5	150	30 000
ap080-fz10-S30	0,080	10	300	30 000
ap080-fz05-S45	0,080	5	225	45 000
ap160-fz05-S75	0,160	5	375	75 000
ap160-fz10-S75	0,160	10	750	75 000
ap160-fz10-S60	0,160	10	600	60 000
ap080-fz10-S60	0,080	10	600	60 000
ap080-fz05-S75	0,080	5	375	75 000
ap160-fz05-S60	0,160	5	300	60 000
ap080-fz05-S60	0,080	5	300	60 000
ap080-fz10-S75	0,080	10	750	75 000

Posteriormente se procedió con la generación del código de ranurado en SolidCam® 2011 usando como parámetros de corte los de la primera corrida. La velocidad de giro (S), el avance lineal (F) y la profundidad axial (a_p), se modificaron en el código (ver Figura 28) antes de cada prueba para definir el proceso de corte según los niveles correspondientes al número de corrida.

```

0 BEGIN PGM CORRIDAteSiY MM
1 ; PMMAR_15X5_HTA200
2 ; G-Coded: 04-MAY-2012 @ 18:20
3 ; H code generator v1.1 by J. Pacheco
4 ; COPYRIGHT 2011
5 ; [...] !
6 ; -----TOOLING INFO-----
7 BLK FORM 0.1 Z X-7,5 Y-7,5 Z-5
8 BLK FORM 0.2 X+7,5 Y+7,5 Z+0
9
10
11
12
13
14 ; ***** TOOL CHANGE *****
15 TOOL CALL 23 Z S45000
16
17
18
19
20
21
22
23
24 ; MAIN HOME - TOP DATUM
25 ; *** F-contour ***
26 M3
27 M510
28 L X-5 Y-5,44 F800
29 L Z+2 F800
30 L Z-0,16 R0 F300
31 L X+5 R0 F450
32 L Z+2 F800
33 L X-5 Y-4,53 F800
34 L Z-0,16 R0 F300
35 L X+5 R0 F450
36 L Z+2 F800
37 L X-5 Y-3,62 F800
38 L Z-0,16 R0 F300
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77 L X-5 Y+5,48 F800
78 L Z-0,16 R0 F300
79
80

```

Variable - N

Variable - F

Variable - a_p

Figura 28. Imagen parcial del código de mecanizado para operaciones de ranurado

Para evitar problemas de captación de fuerza o saturación en el eje Z, el avance máximo para los movimientos donde no hay corte se limitó a 800 mm/min. Aunque el tiempo del proceso de corte se incrementa un poco, se asegura que la adquisición de datos sea continua e incluya información de los tres ejes (F_x , F_y , F_z).

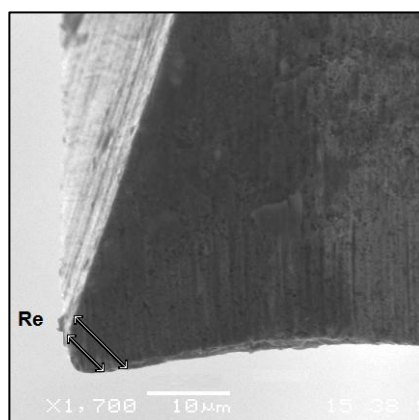
4.2.2 Caracterización de herramientas a utilizar

Debido a la técnica de fabricación de las micro-fresas la mayoría presentan una diferencia superior con respecto al diámetro especificado por el fabricante, por este motivo tampoco se espera contar un radio de filo R_e constante. Para establecer los valores geométricos iniciales de la herramienta (R y R_e) se empleó el equipo de medición por láser, el microscopio Tesa y el SEM. Los datos iniciales para las herramientas se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Caracterización de micro-fresas nuevas

Herramienta	R (mm)	Re (μm)	Herramienta	R (mm)	Re (μm)
ap160-fz05-S45	0,1147	$2,21 \pm 0,5$	ap160-fz05-S75	0,1027	$2 \pm 0,5$
ap080-fz05-S30	0,1132		ap160-fz10-S75	0,0991	
ap160-fz10-S30	0,1063		ap160-fz10-S60	0,0946	
ap160-fz10-S45	0,1032		ap080-fz10-S60	0,1013	
ap080-fz10-S45	0,1085		ap080-fz05-S75	0,0980	
ap160-fz05-S30	0,1031		ap160-fz05-S60	0,0996	
ap080-fz10-S30	0,1102		ap080-fz05-S60	0,0998	
ap080-fz05-S45	0,1183		ap080-fz10-S75	0,0947	

Inicialmente se tomaron imágenes en el SEM para verificar condiciones generales de la herramienta y del filo. Debido a la complejidad de la medición del radio de filo verdadero, para esta investigación dicho aspecto se midió en dirección perpendicular a la longitud de la herramienta. De esta forma el desgaste registrado en la proyección del R_e será proporcional al ocurrido en su medida real. En la Figura 29 se muestra el filo de la herramienta y se indica la ubicación del radio de filo.

**Figura 29.** Imagen SEM del radio de filo (1 700X)

La medición de los radios de filo se realizó con el microscopio TESA Visio®, se trabajó en modo: “medición”; para geometría se indicó: “circunferencia”; y se tomaron cinco puntos cercanos al radio de filo en la zona mostrada con líneas rojas, como se muestra en la parte derecha de la Figura 30.

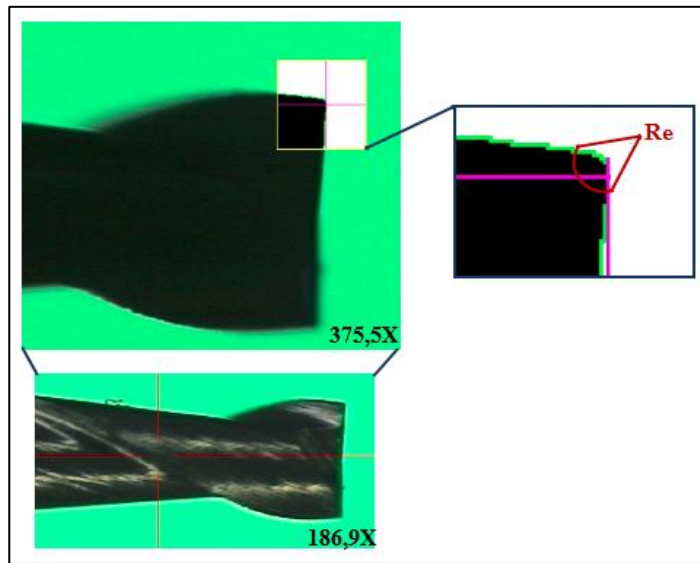


Figura 30. Medición del radio de filo Re, usando microscopio Tesa Visio® 200 GL

4.2.3 Preparación de la pieza de trabajo

En este apartado se describen las operaciones realizadas al disco de PMMA previas al mecanizado de las ranuras.

Preparación del disco

El polímero se utiliza como lo entrega el proveedor, es decir, no se aplicó ningún tratamiento previo para modificar sus propiedades. El disco se mecanizó antes de las pruebas de ranurado para proporcionarle una geometría en la que el recorrido de la herramienta sea el mismo (10 mm x ranura); el contorno no se realizó en todo el espesor para dejar una superficie que facilite fijación y manipulación. Para esta operación se generó un código de mecanizado en lenguaje h. En la

Figura 31 se presentan los planos y dimensiones finales del disco después del mecanizado del contorno, las ranuras se incluyen para dar una idea de su orientación en el proceso de corte.

El disco se fijó a la placa del dinamómetro mediante cera de bloqueo azul; ésta se lleva hasta su punto de fusión, se aplica sobre la superficie de apoyo y posteriormente se coloca el disco con una leve presión, la cual permite eliminar el exceso de cera formando una capa delgada y uniforme. En la

Figura 32 (izquierda) se muestra el disco adherido a la placa, con el contorno mecanizado y la cera de bloqueo.

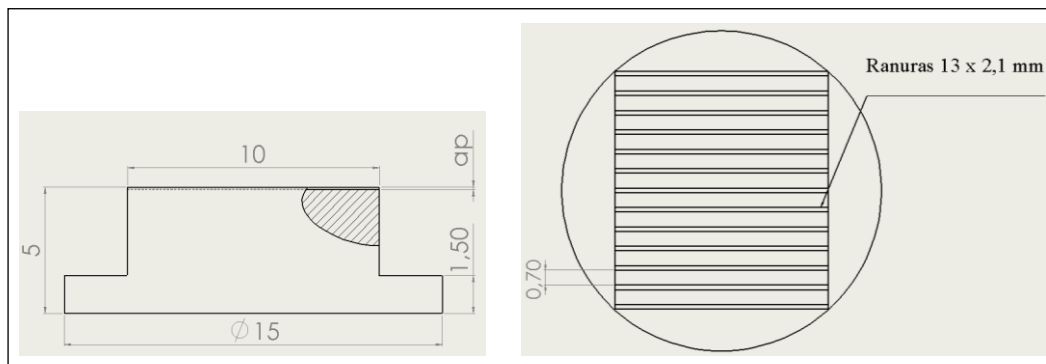


Figura 31. Planos preparación disco, incluyendo ranuras. *Izquierda:* vista frontal. *Derecha:* vista superior.

En el posicionamiento del disco con referencia al eje Z, se permitió una desviación máxima de 20 μm . Sin embargo para llevarla al mínimo, se realizó antes del contorno un planeado de 200 μm con respecto al punto más bajo detectado con el palpador. Posteriormente se determinó el nuevo cero respectivo.

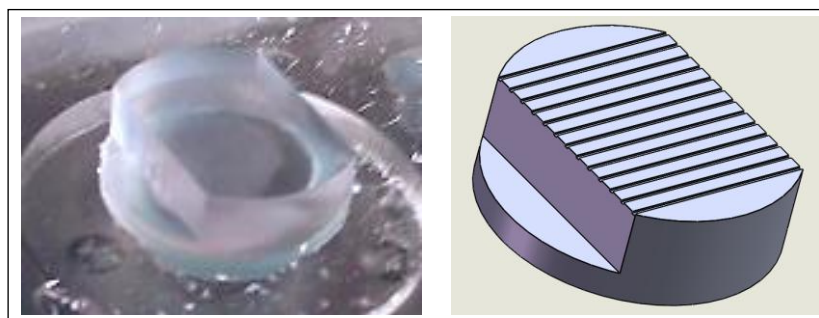


Figura 32. *Izquierda:* preparación del disco para ranuras. *Derecha:* CAD del disco, incluyendo ranuras

4.2.4 Montaje de los dispositivos

En este numeral se ilustrarán los equipos y la forma de conexión entre ellos para la realización de las pruebas de mecanizado y la adquisición de datos. En cuanto a la sujeción de los discos de PMMA al dinamómetro cada institución optó por un sistema

diferente. En Uninorte se empleó cera de bloqueo y en Ideko un sistema de amarre temporal. En las siguientes imágenes se aprecia el montaje realizado.

Centro de micro-mecanizado Kern Evo

- Como se mencionó en el apartado de preparación de la pieza, el disco de PMMA se adhiere a una placa de acrílico mediante cera de bloqueo azul. Esta placa está fija al dinamómetro y se encuentra mecanizada de tal forma que la sujeción se realice mediante una capa delgada y uniforme de cera. En la Figura 33 se muestra el sistema completo.

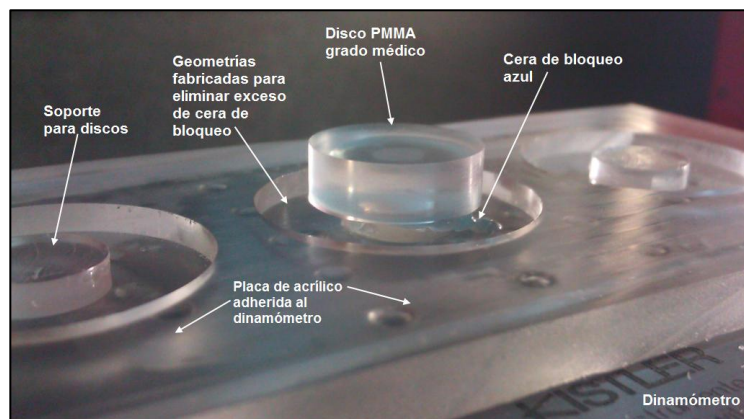


Figura 33. Montaje disco – placa - dinamómetro

- El dinamómetro se encuentra fijo a un bloque rectificado de Aluminio y este a su vez sujetado a la máquina por medio de una prensa de precisión. Esta configuración proporciona altura para las operaciones de corte (ver Figura 34).
- El cable apantallado que sale del dinamómetro va conectado al amplificador de señal y este a su vez se conecta a la tarjeta de adquisición de datos la cual por medio de conexión USB envía la información capturada al computador desde donde se corre el respectivo VIs de LabVIEW en el entorno del panel frontal (ver Figura 19).
- El cable apantallado evita la perturbación de la señal con el ruido electromagnético [21].
- El microscopio portátil permite verificar las operaciones realizadas en tiempo real, adquirir imágenes y registrar videos de los procesos de corte.

- El sistema de adquisición de datos está compuesto por: equipo de medición láser, microscopio portátil ProScope HR2™ y computador asociado, dinamómetro, cable apantallado, amplificador, tarjeta de adquisición de datos y computador asociado (ver Figura 34).

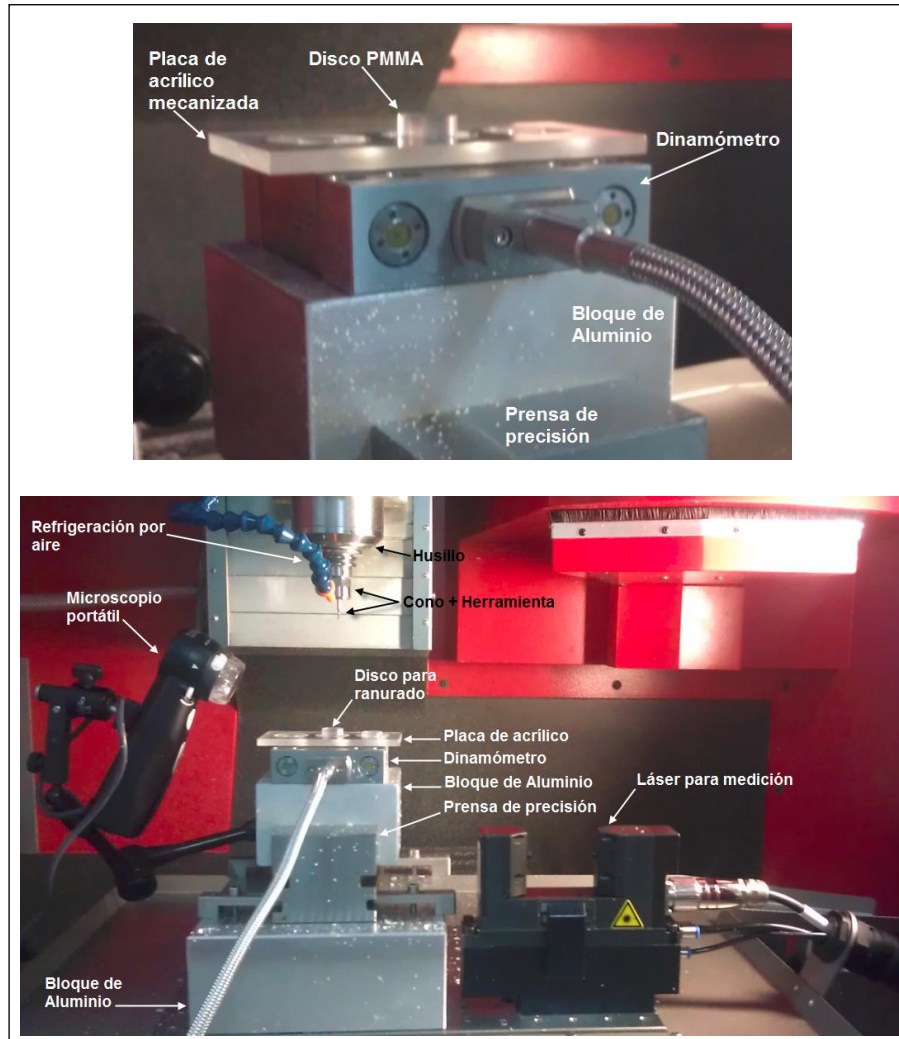


Figura 34. Montaje de equipos para pruebas de ranurado. *Arriba:* placa de acrílico - dinamómetro – prensa de precisión. *Abajo:* Configuración completa final

Micro-fresadora IK Mill

- Inicialmente en Ideko se pensó el uso de un sistema de agarre mecánico (sistema de garras) mediante un sistema FTS. Este sistema consta de un mandrino neumático con repetibilidad de $\pm 2 \mu\text{m}$. Lo que permite medir la pieza en

cualquier momento del proceso, sin perder la posición inicial. Sin embargo el peso generado sobre el dinamómetro afectó las mediciones de fuerzas. Por tal motivo se optó por adherir temporalmente el disco de PMMA a una placa fija al dinamómetro, como se muestra en la Figura 35.

- El dinamómetro está conectado mediante un cable apantallado a un equipo de adquisición de datos integrado (PULSE LAN-XI).

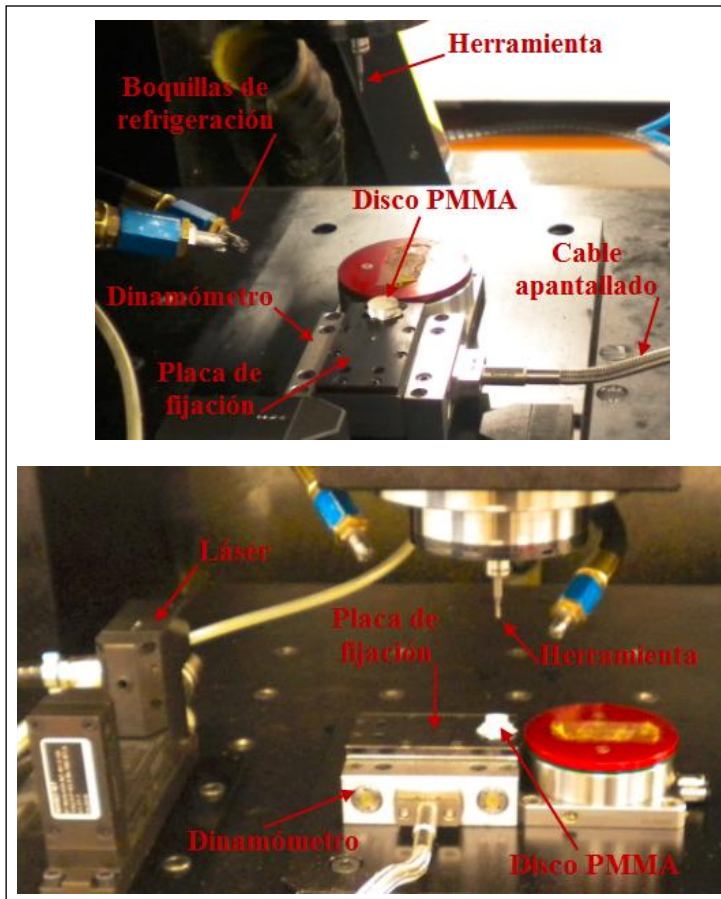


Figura 35. Montaje de equipos para pruebas de ranurado. *Arriba:* fijación del disco. *Abajo:* Configuración completa

4.2.5 Desarrollo de los experimentos

En los ensayos de microfresado para el análisis de desgaste de la herramienta se realizaron diferentes actividades; sin embargo las etapas principales del proceso se pueden resumir en las siguientes:

- Preparación del disco: en esta etapa se fija el disco a la placa del dinamómetro, se ejecuta el programa para fabricar el contorno del mismo y finalmente se realiza una operación de desbaste para asegurar planitud. Incluye montaje de herramienta de estudio (\square 200 μm) y establecimiento de cero de pieza.

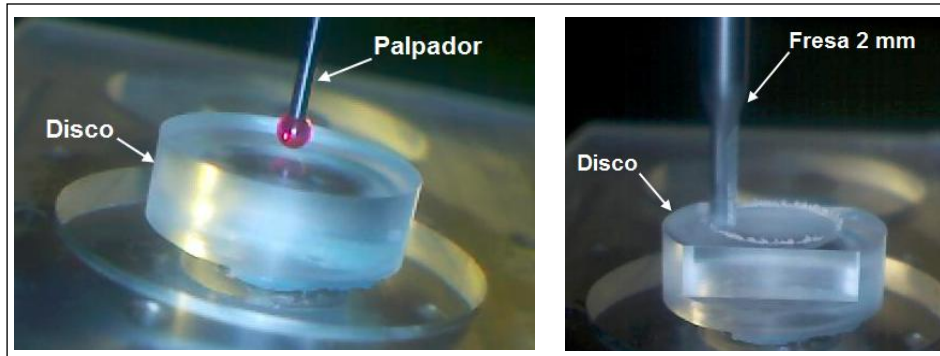


Figura 36. Preparación del disco. *Izquierda:* establecimiento de cero de pieza en Z. *Derecha:* desbaste inicial.

- Alistamiento de equipos de adquisición de datos: en esta fase se conectan los equipos que realizan esta función y se establecen sus valores de trabajo. Incluye la modificación del programa de mecanizado para las ranuras y la toma de datos del láser.

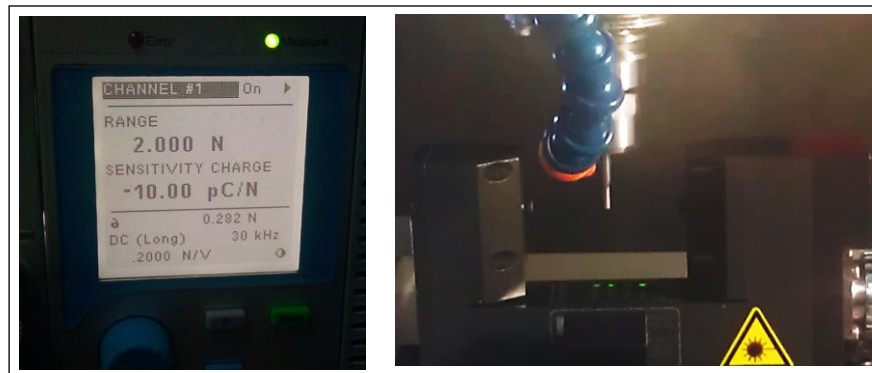


Figura 37. Alistamiento de equipos. *Izquierda:* pantalla de control del amplificador. *Derecha:* sistema de medición láser.

- Ejecución de programas de experimentación: en esta etapa se corren simultáneamente el programa de ranurado y la herramienta virtual diseñada para la adquisición de fuerzas de corte. Para lograr un recorrido significativo de la herramienta, estos programas se ejecutan 10 veces por disco. Lo anterior requiere

que luego del ranurado fuera necesario realizar una nueva operación de desbaste y establecer un nuevo cero de pieza para el eje Z.

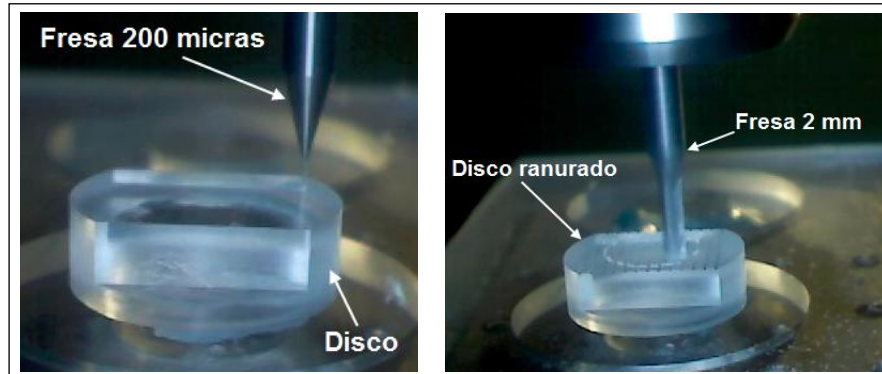


Figura 38. Proceso de ranurado. *Izquierda:* ranurado. *Derecha:* desbaste después de cada ranurado

- Verificación de almacenamiento de información: en esta última etapa, se comprueba que los datos adquiridos por el dinamómetro se hayan guardado correctamente en la carpeta y archivo de destino. También se captura la lectura del láser del radio y longitud de la herramienta de corte.

LISTA DE CHEQUEO PARA EXPERIMENTACIÓN: CORRIDA Y HERRAMIENTA NUEVA		
	Actividad	Comentario
1	<input type="checkbox"/> Ajustar temperatura	Aire acondicionado en 20 °C
2	<input type="checkbox"/> Ajustar humedad	Deshumidificador en 45% - 55 %
3	<input type="checkbox"/> Encender maquina	Seguir protocolo de encendido
4	<input type="checkbox"/> Calentar husillo	Correr programa calentamiento
5	<input type="checkbox"/> Preparar herramienta	Cono + tuerca. Torque 10 Nm
6	<input type="checkbox"/> Medir manualmente longitud herramienta	
7	<input type="checkbox"/> Montar herramienta en magazin	Verificar posición
8	<input type="checkbox"/> Crear herramienta en tabla de herramientas	Ingresar manualmente L, R, filos, TTL-offset, TTR-offset
9	<input type="checkbox"/> Verificar herramientas para contorno, desbaste y ranuras	Existencia y estado
10	<input type="checkbox"/> Cargar programa contorno disco	
11	<input type="checkbox"/> Editar programa contorno disco	Verificar herramienta, posición, variables
12	<input type="checkbox"/> Cargar programa desbaste disco	
13	<input type="checkbox"/> Editar programa desbaste disco	Verificar herramienta, posición, variables

Figura 39. Vista parcial lista de chequeo para experimentación: corrida y herramienta nueva

Para la ejecución de las pruebas de ranurado, se elaboró un protocolo que asegura la ejecución de cada actividad de manera esquemática, lo cual asegura en cierta forma la repetibilidad en las operaciones de corte; tanto en la manipulación de los equipos como en el ingreso de datos en interfaz humana. En la Figura 39 se muestra una vista parcial del protocolo mencionado y en el apéndice F se presenta el listado completo.

Técnicas de inspección

Para la inspección se tomaron en cuenta dos temas importantes. El primero se centra en las micro-herramientas, para éstas se procedió a medir el radio de filo R_e y se verificó visualmente la presencia de material adherido al cuerpo. El segundo se enfoca en la medición y revisión de parámetros relevantes, tales como, profundidad de ranuras (entrada y salida) y cantidad de rebaba producida.

Debido a las geometrías y tamaños de las piezas a medir, fue necesario diseñar y fabricar una base para herramientas que proporcionara altura y permitiera posicionar tanto las herramientas como los discos de forma fácil y rápida para su correcta medición. El requisito principal era que debía ser fabricado en un material transparente, que no obstruya ninguna de las iluminaciones que posee el microscopio TESA Visio® 200 GL; además debía permitir manipular fácilmente las herramientas y los discos sin necesidad de desmontarlos de la base.

A continuación se presentan imágenes de la base (Figura 40), fabricada en láminas de acrílico de 5 mm de espesor. El corte de estas piezas se realizó mediante láser para no perder la transparencia del material; la geometría de la placa superior se hizo mediante mecanizado en la máquina Kern Evo.

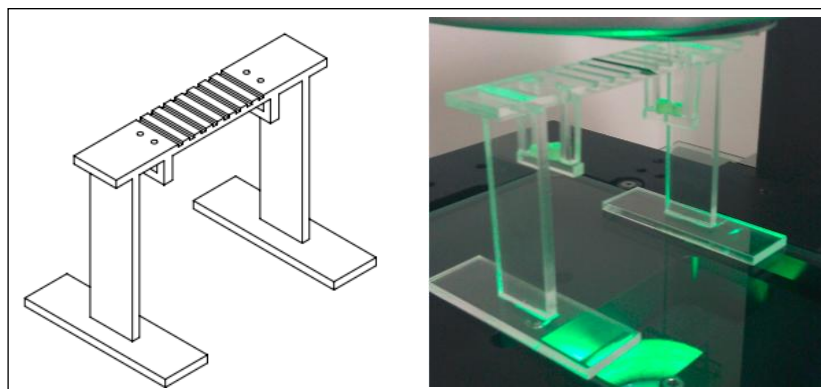


Figura 40. Base para herramientas. *Izquierda:* planos de conjunto. *Derecha:* base fabricada y en uso

En la Figura 41 se presentan algunas de las imágenes obtenidas de las ranuras y herramientas con el microscopio TESA Visio® 200 GL.

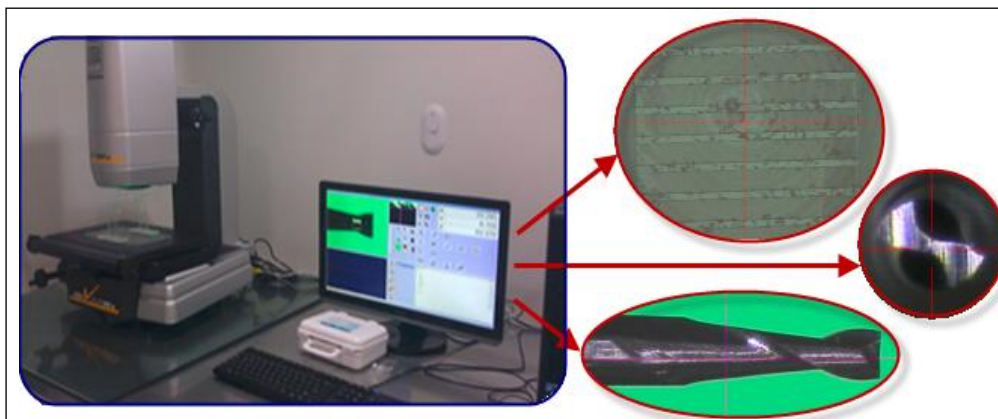


Figura 41. Inspección de discos y herramientas

De igual manera que para el proceso de mecanizado, se elaboraron protocolos de inspección y medición para las herramientas y los discos. En las Figura 42 y Figura 43 se presentan vistas parciales de las listas de chequeo, los pasos completos se encuentran en los apéndices G y H, respectivamente.

LISTA DE CHEQUEO PARA INSPECCIÓN DE HERRAMIENTAS		
	Actividad	Comentario
1	Encender microscopio	Procedimiento encendido de: Computador + microscopio
2	Inicializar ejes del microscopio	Desplazarlos hasta que el sensor se active
3	Instalar lente de 2X en microscopio	
4	Indicar al equipo el tipo de lente a utilizar	
*	Calibrar	
5	Posicionar herramientas a inspeccionar	
*	Ubicar herramienta en la base para microscopio	Emplear lupa para ubicar filos
*	Posicionar pieza en X y Y	Mover mesa hasta ubicarla en rango de visión
*	Enfocar en Z	Usar avances y micro-avances
6	Configurar iluminación	
*	Establecer niveles de luz difusa (verde)	Encender y llevar al máximo
*	Establecer niveles de luz paralela (blanca)	Apagar
*	Establecer niveles de luz coaxial (segmentada)	Encender e ir subiendo para tomar imágenes detalladas de la herramienta
7	Aumentar la imagen	Aumentar nivel con ícono de "lupa"

Figura 42. Vista parcial lista de chequeo para inspección de herramientas

LISTA DE CHEQUEO PARA INSPECCIÓN DE DISCOS RANURADOS		
	Actividad	Comentario
1	Encender microscopio	Procedimiento encendido de: Computador + microscopio
2	Inicializar ejes del microscopio	Desplazarlos hasta que el sensor se active
3	Instalar lente de 2X en microscopio	
4	Indicar al equipo el tipo de lente a utilizar	
	* Calibrar	
5	Posicionar disco a inspeccionar	Tener en cuenta la marca de inicio de ranuras
	* Ubicar disco en la base para microscopio	Emplear lupa para ubicar filos
	* Posicionar pieza en X y Y	Mover mesa hasta ubicarla en rango de visión
	* Enfocar en Z	Usar avances y micro-avances
6	Configurar iluminación	
	* Establecer niveles de luz difusa (verde)	Encender y llevar al máximo
	* Establecer niveles de luz paralela (blanca)	Apagar
	* Establecer niveles de luz coaxial (segmentada)	Encender e ir subiendo para tomar imágenes detalladas de las ranuras
7	Aumentar la imagen	Aumentar nivel con ícono de "lupa"

Figura 43. Vista parcial lista de chequeo para inspección de discos ranurados

En el apartado de resultados se presentan los datos recopilados mediante la aplicación de los protocolos de mecanizado e inspección.

Medición de rugosidad

Para las pruebas de AFM no es necesario recubrir el material a analizar. Sin embargo se debe asegurar que la superficie de la probeta esté completamente limpia debido a la sensibilidad del equipo, de esta forma se evitan mediciones erróneas de rugosidad. La preparación para la medición consiste en tres pasos: inicializar el controlador, instalar el cantiliver e instalar la probeta [70].

- Conectar y encender el controlador. Seleccionar el modo de operación (fuerza estática, fuerza dinámica, entre otros), también se debe determinar el medio en el que se realizará la medición (aire o líquido). Para las mediciones de esta investigación se seleccionó modo fuerza dinámica y el medio para la prueba fue aire.
- Seleccionar el tipo de cantiliver (longitud aproximada 228 μm) de acuerdo al modo de operación previamente establecido. Se verifica que el cantiliver y la punta se encuentran perfectamente limpias, luego se procede a ensamblar ambas al equipo. Finalmente, se debe alinear el sistema. En este caso se trabajó con un cantiliver tipo NCLR y una cabeza tipo EZ2-FlexAFM. La punta para la medición es un polígono similar a una pirámide, con una altura de 10 μm – 15 μm y en el extremo final posee un radio de curvatura menor a 8 nm [73]. En la Figura 44 se muestran la punta y el cantiliver empleados.

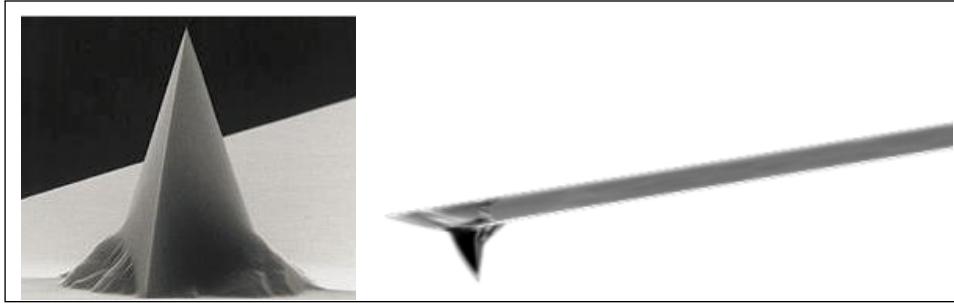


Figura 44. Elementos para medición en AFM. *Izquierda:* detalle punta [73].
Derecha: cantiliver completo [70]

- Remover polvo, grasa u otros contaminantes de la probeta a examinar. Especialmente si el medio empleado para la medición es aire. Finalmente, ubicar la probeta en el equipo para iniciar la medición. En la Figura 45 se presenta un esquema general del proceso de medición.
- La etapa final del proceso consiste en capturar y almacenar tanto imágenes como mediciones de interés (S_a , S_m , S_v , S_p y S_y). Se establecieron zonas de $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ para la primera medición y posteriormente, se tomó una zona de acercamiento de $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ como segunda medición.

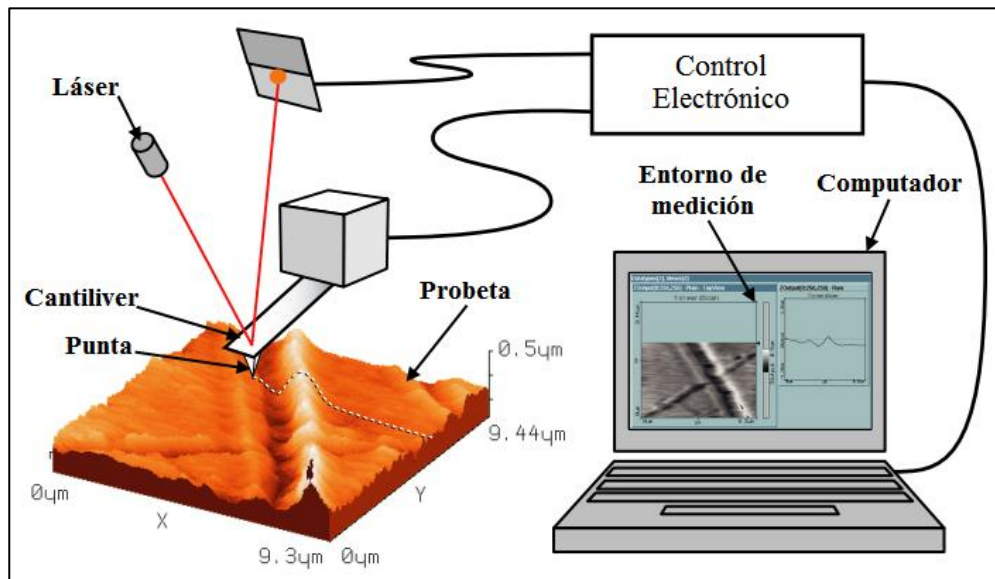


Figura 45. Escaneo de la probeta mediante técnica de AFM [70]

En el capítulo de resultados se presentan los valores y algunas de las imágenes obtenidas mediante la técnica de AFM y el escaneo confocal.

Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales del recinto, tales como temperatura y humedad relativa, fueron controladas para obtener una medición fiable del dinamómetro. Estas condiciones minimizan contracciones y dilataciones de pieza, equipo y herramienta durante el proceso de corte.

Para las pruebas de ranurado la temperatura se mantuvo en $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa en 20% - 50%. Estas condiciones se encuentran dentro de los valores estándar para fabricaciones de ultra-precisión [27], [51], [55], [74] y los requeridos para la óptima operación de los equipos de adquisición de datos.

4.3 INCERTIDUMBRE DEL PROCESO

Los factores que podrían afectar la precisión de los resultados obtenidos en esta investigación (incertidumbre) se pueden encontrar en: la máquina, el proceso mismo y los equipos auxiliares; además de la posible interrelación entre estos [21].

La incertidumbre típica combinada (β_j) se puede calcular utilizando la ecuación 5 [75], que se presenta a continuación.

Ecuación 5

- Para la incertidumbre de la máquina, al no contar con los equipos necesarios para realizar las mediciones de mecánica de los carros, reglas de medición de la posición y deformaciones térmicas, entre otros; se toma el parámetro de desviación de posición de $0,5\text{ }\mu\text{m}$ indicado por el fabricante Kern.
- Cuando se trabaja con una herramienta micro, su pequeño tamaño acentúa cualquier desalineación en el husillo de la máquina, el portaherramientas y la boquilla [76]. Por lo tanto la incertidumbre generada por el 'run-out' o salto radial se determinó con un comparador de carátula y una barra de precisión. Aunque los husillos de precisión pueden proporcionar un error de salto de $1\text{ }\mu\text{m}$, el conjunto cono – herramienta (Figura 46) amplifican este valor. La mayoría de las microfresas presentan un error de salto de $3\text{ }\mu\text{m}$ aproximadamente y si se emplean boquillas de súper-precisión como en este caso que presentan un salto menor de $3\text{ }\mu\text{m}$ [19]. Para mantener estos valores es necesario calibrar el diámetro de la herramienta antes del mecanizado, para este caso se realiza con el láser. Adicionalmente es necesario mantener una muy buena limpieza en el conjunto cono – herramienta y asegurar la aplicación del torque necesario en su ensamblaje; para este caso se emplea una llave con torquímetro calibrado para

aplicar 10 N·m en el ajuste de la tuerca – pinza – herramienta. Aplicando la ecuación 5, se obtiene una incertidumbre para estos elementos de $4,36 \mu\text{m}$



Figura 46. Conjunto herramienta - cono - boquilla

- La incertidumbre del proceso de corte radica en la flexión de la herramienta, su desgaste, las vibraciones y la formación de rebabas. Si se realiza una aproximación teórica de considerar la herramienta de $200 \mu\text{m}$ de diámetro como una viga cilíndrica empotrada, se obtienen valores de flexión aproximados a $1 \mu\text{m}$. El efecto del desgaste no es independiente; sin embargo la variación del diámetro es compensado por el sistema de medición láser. Debido a las profundidades y avances empleados para los procesos de ranurado en esta investigación, se asume que se presenta un corte estable y por lo tanto el *chatter regenerativo* no se presenta en el proceso. En cuanto a las rebabas, el efecto depende del material y la geometría a fabricar; la definición de vértices y aristas presenta una incertidumbre de $1 \mu\text{m}$ a $2 \mu\text{m}$ [19], [21]. Para el caso que nos ocupa se tomó un valor de referencia de $0,5 \mu\text{m}$.
- En el caso de los elementos auxiliares, la incertidumbre debe ser estimada con referencia a los equipos de medición por láser, palpador y microscopio TESA. La medición por láser de las herramientas se realiza bajo las condiciones de operación (a igual S) y sin la intervención de refrigerantes líquidos, por lo que puede estimarse una precisión de $5 \mu\text{m}$. En la toma de referencias con el palpador el error estimado está en $1 \mu\text{m}$. Para las mediciones realizadas en el microscopio tanto en las inspecciones de las herramientas como de los discos, la desviación máxima presentada ha sido de $3 \mu\text{m}$.

De lo anterior se tiene que la incertidumbre total (ecuación 5) en la experimentación fue de $7,4 \mu\text{m}$.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos con las operaciones de ranurado. Se comparan los valores de fuerzas medidos durante el mecanizado con las fuerzas calculadas mediante la aplicación del modelo de fuerzas, usando los coeficientes de corte encontrados experimentalmente. Mediante un análisis de frecuencias se verifica la condición de corte estable durante el proceso de mecanizado. También se analizan las combinaciones de condiciones de corte con base en las mediciones de rugosidad en el piso de las ranuras y la cantidad de rebaba generada en los bordes de las mismas. Adicionalmente, se realiza seguimiento a la evolución al radio de filo y diámetro de las herramientas.

5.1 FUERZAS DE CORTE EN EL MICROFRESADO

En la Figura 47 se identifican los ejes coordenados involucrados en la adquisición de fuerzas de corte, según la orientación del dinamómetro y la dirección de mecanizado de las ranuras.

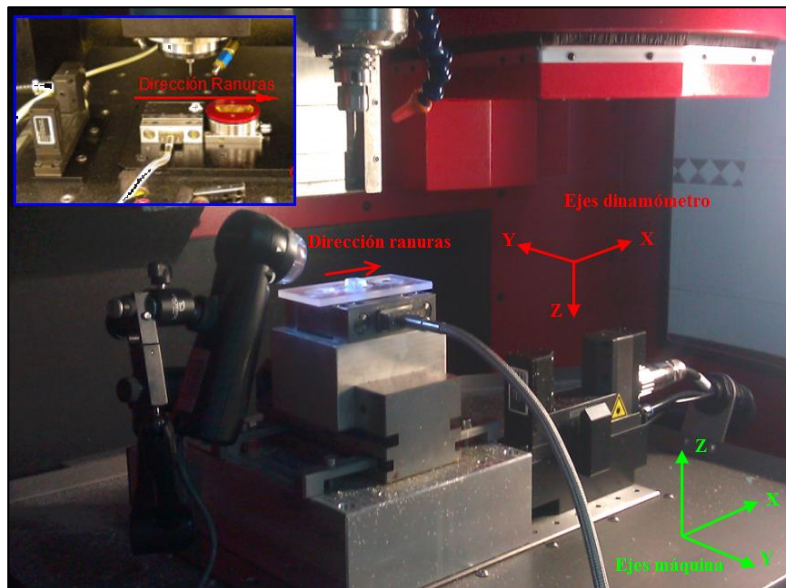


Figura 47. Orientación ejes coordenados para adquisición de datos

Durante las pruebas de ranurado y para cada nivel de profundidad de corte, se removieron $20,8 \text{ mm}^3$ y $41,6 \text{ mm}^3$ respectivamente. La longitud recorrida por la herramienta fue de 1300 mm, al mecanizar 130 ranuras por probeta. Durante el proceso de corte se capturaron los valores de fuerza generados en cada uno de los ejes coordenados, en la Figura 48 se muestran las señales adquiridas.

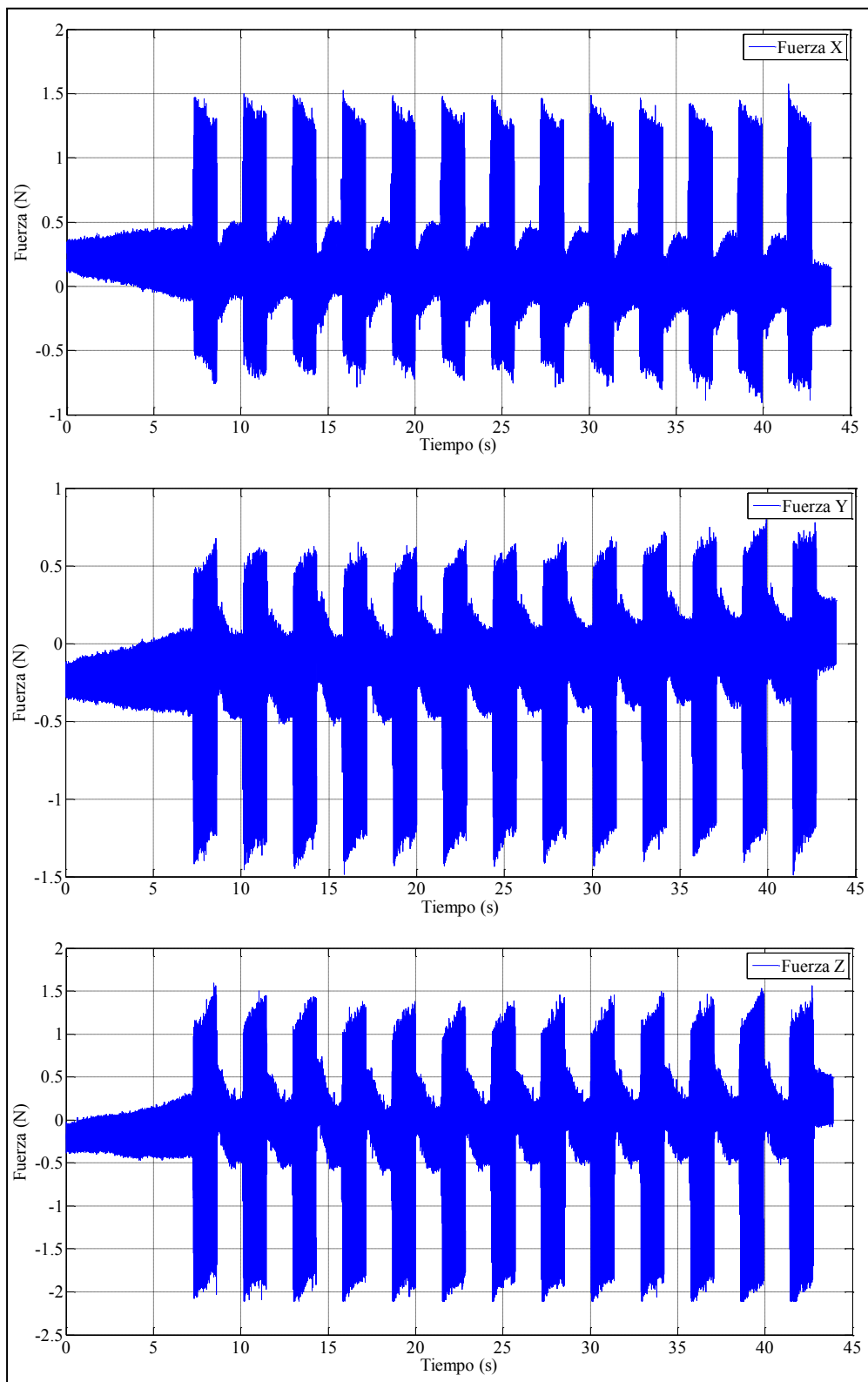


Figura 48. Señal de fuerza adquirida combinación ap160-fz10-S45. Arriba: avance (eje X). Centro: normal (eje Y). Abajo: axial (eje Z). Ver Tabla 13

Por cada probeta mecanizada se capturaron diez señales por cada eje, como las arriba mostradas. Debido a la geometría de la probeta y a la necesidad de mecanizar una cantidad representativa de material, en cada disco se realizaron 10 pasadas de 13 ranuras con 10 mm de longitud cada una.

Puesto que los grupos de señales adquiridas para cada combinación no presentan una variación significativa en su desarrollo, es decir que la gráfica de la señal no tiende a caer o incrementarse, se puede inferir que la profundidad de las ranuras se mantiene relativamente estable y dentro de los valores establecidos en el programa de mecanizado. Adicionalmente, en las señales de los ejes se observan picos mayores al inicio de cada ranura, lo que podría indicar que al momento de entrar en el material, la herramienta no logra el equilibrio entre la fuerza de restitución elástica y la flexión de la misma.

Para verificar la desviación de la pieza, se miden las profundidades de ranura de algunas de las probetas mecanizadas. Los resultados se presentan en la Figura 49.

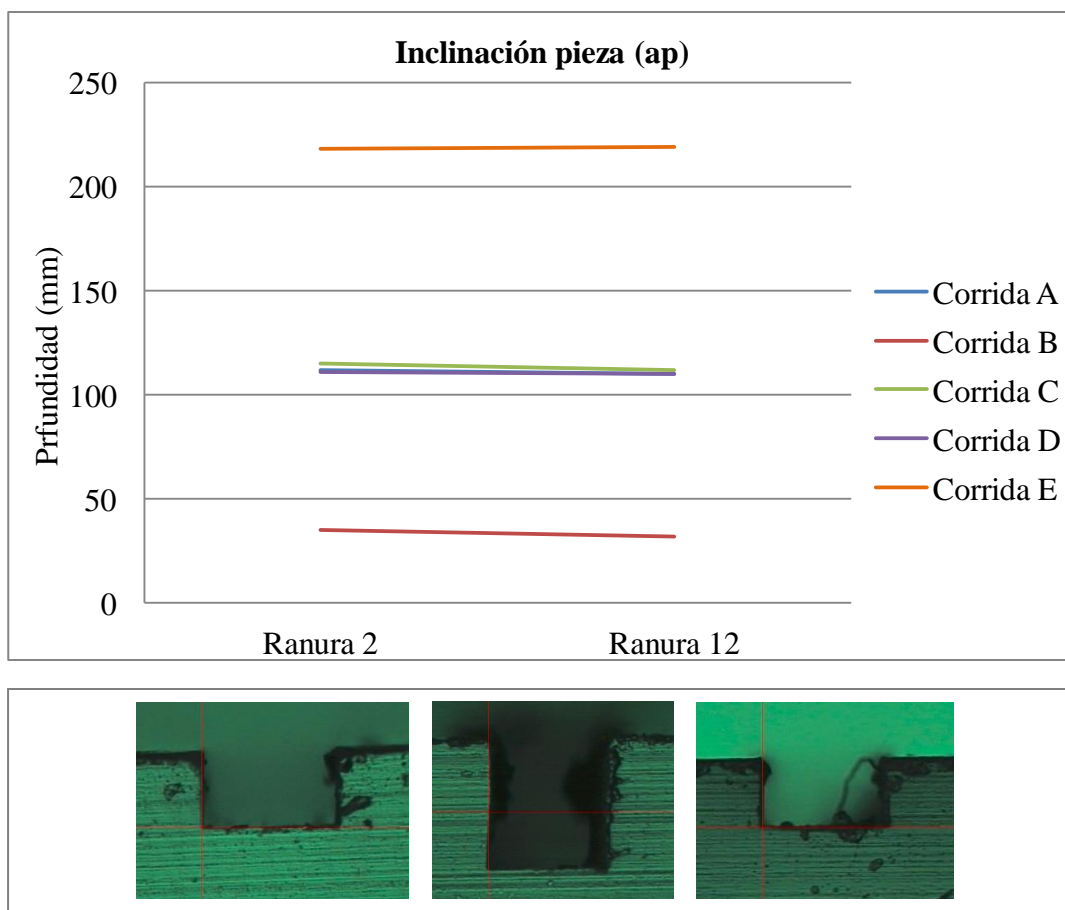


Figura 49. Medición de la profundidad de pasada

Para facilitar el manejo y tratamiento de los datos adquiridos se desarrollaron una serie de códigos en Matlab®. Con uno de estos programas se determinaron los valores máximo, mínimo, media y RMS para cada tanda de 13 ranuras. En la Figura 50 se representa gráficamente la información extraída de la información capturada para cuatro vueltas, en la treceava ranura de la pasada 8. Este mecanizado se realizó con la combinación ap160-fz05-S30.

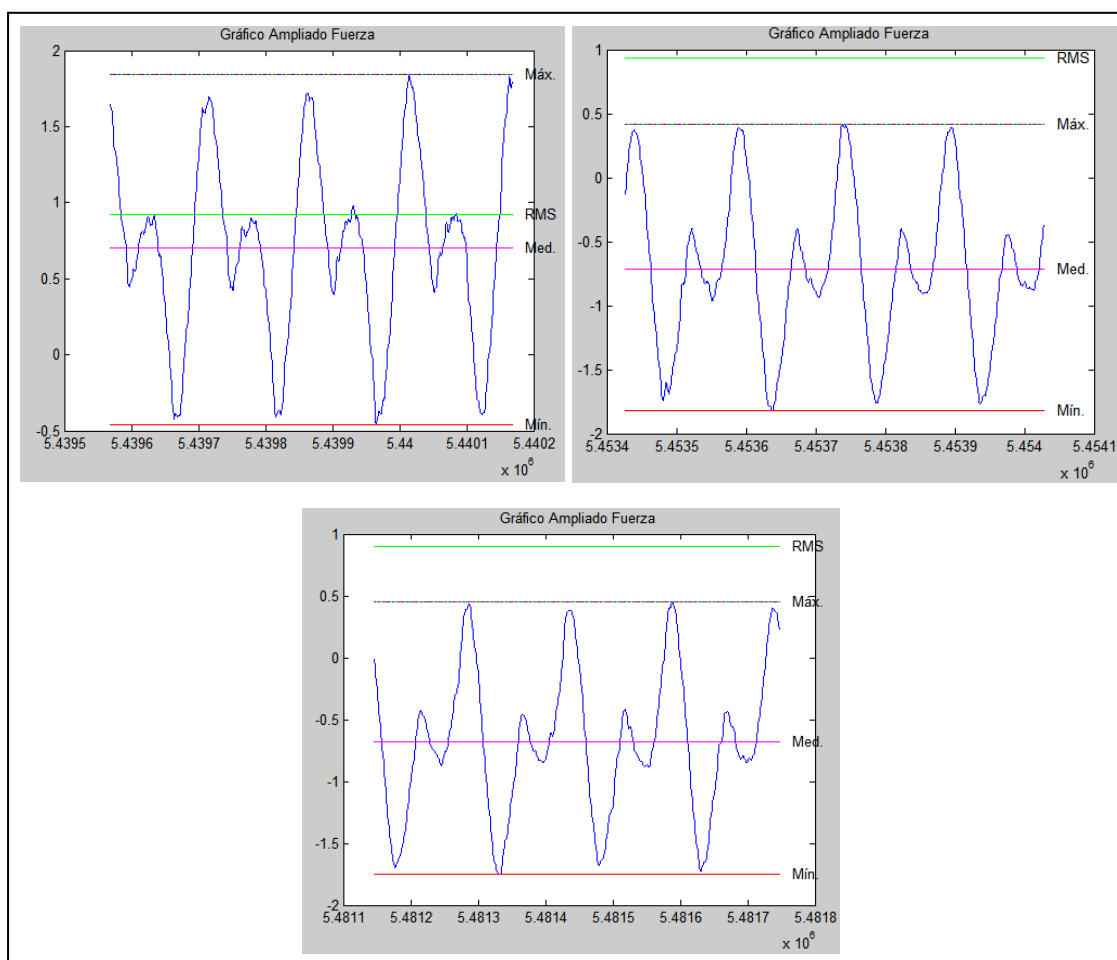


Figura 50. Gráficas del tratamiento realizado a la información capturada. Pasada 8 de la combinación ap160-fz05-S30. *Izquierda:* fuerzas en X. *Derecha:* fuerzas en Y. *Abajo:* fuerzas en Z.

Una vez verificada la tendencia en el comportamiento de las fuerzas, tanto en sus valores medios como en los RMS; se establece este último parámetro como valor base para el análisis de los resultados presentados en este documento. Así pues, se generaron curvas de comportamiento de las fuerzas RMS con respecto a la longitud recorrida por la herramienta en cada eje, como las que se muestran en la Figura 51.

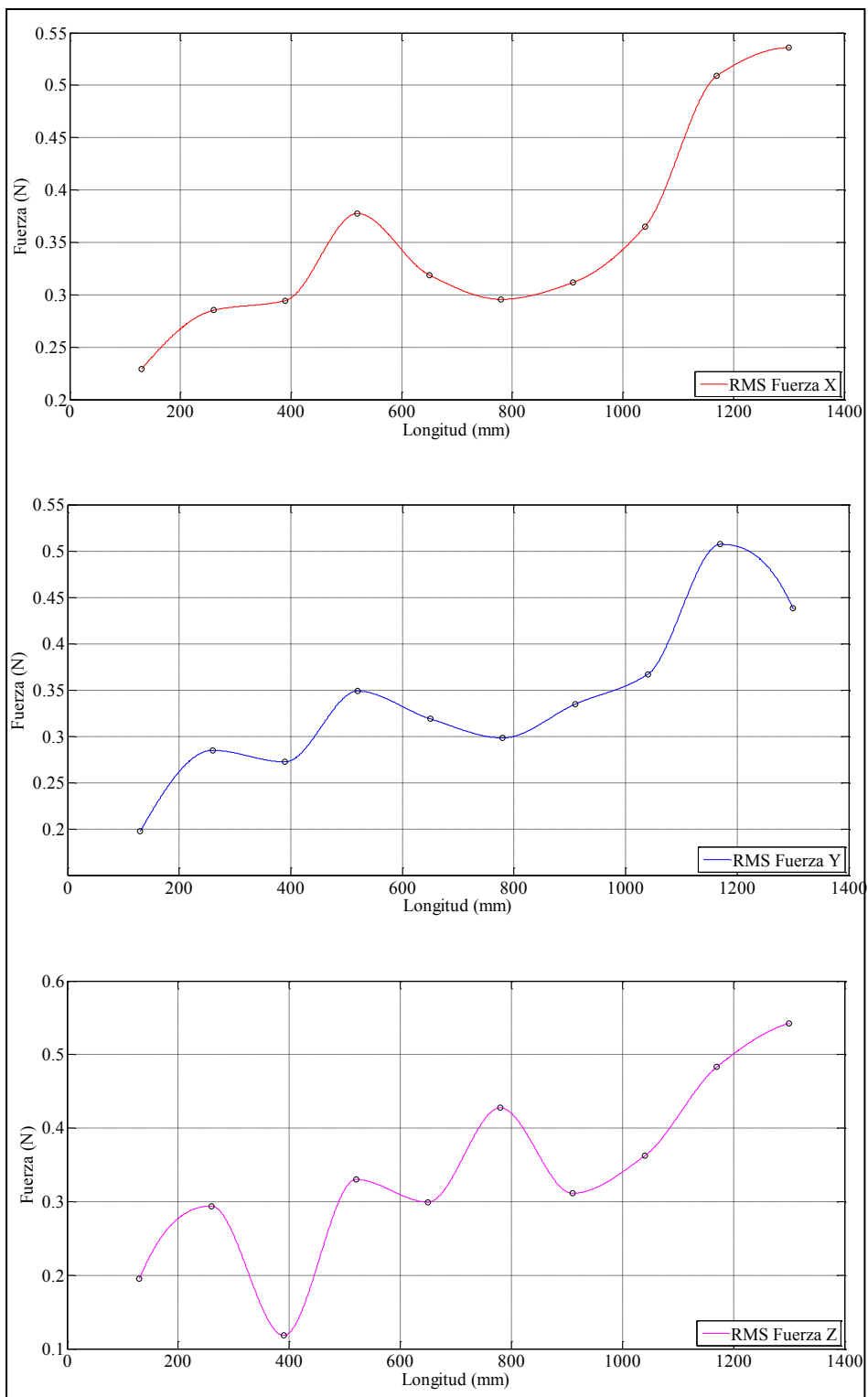


Figura 51. RMS de fuerzas adquiridas combinación ap080-fz10-S45. *Arriba:* avance (eje X). *Centro:* normal (eje Y). *Abajo:* axial (eje Z). Ver Tabla 13

Puesto que la componente axial de la fuerza (eje Z) es baja, el análisis de fuerzas se concentra en el comportamiento de las fuerzas generadas en las direcciones de avance y normal. En la Figura 52 se muestran las fuerzas de avance F_x y normal F_y en la micro-herramienta.

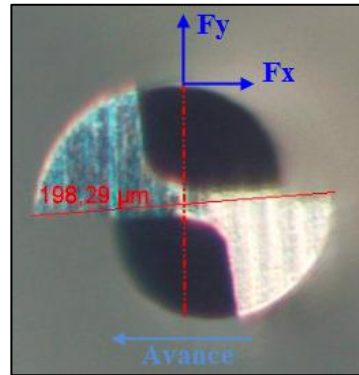


Figura 52. Orientación de las fuerzas de corte en la micro-herramienta

Con el propósito de comprender y presentar más claramente el comportamiento de las fuerzas generadas al mecanizar con las diferentes combinaciones de parámetros de corte, se determinaron las fuerzas normales y de avance máximas para calcular posteriormente la fuerza resultante, teniendo en cuenta que es esta última la que afecta directamente la vida útil de la micro-herramienta. La gráfica resultante y los datos empleados para su generación se presentan a continuación (ver Figura 53 y Tabla 15).

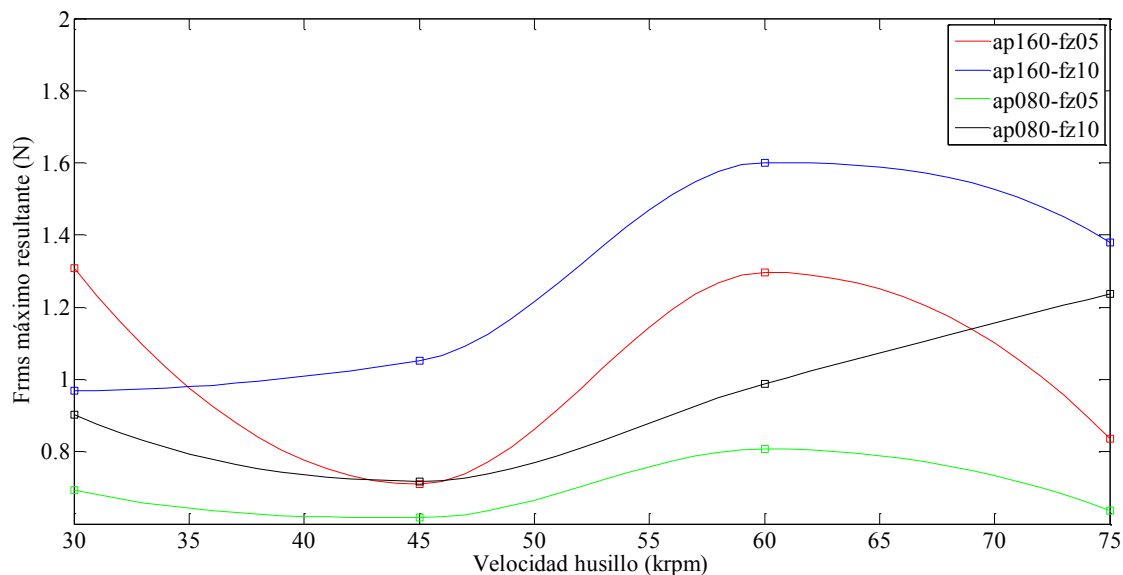


Figura 53. Gráfica: S Vs. FRMS máximo resultante

Tabla 15. FRMS máximo resultante por combinación

COMBINACIÓN	krpm	RMS F_x máx.	RMS F_y máx.	FRMS máx. RESULTANTE
ap160-fz05	30	0,92023	0,9306	1,3088
	45	0,5075	0,4962	0,7098
	60	0,447	1,218	1,2974
	75	0,6351	0,5426	0,8353
ap160-fz10	30	0,6738	0,6967	0,9692
	45	0,7295	0,7564	1,0509
	60	1,201	1,0589	1,6011
	75	0,8323	1,0995	1,3790
ap080-fz05	30	0,5163	0,4643	0,6944
	45	0,3253	0,5239	0,6167
	60	0,4756	0,6529	0,8078
	75	0,3178	0,5524	0,6373
ap080-fz10	30	0,5091	0,5072	0,9029
	45	0,6212	0,6553	0,7186
	60	0,4928	0,8564	0,9881
	75	0,7706	0,9683	1,2375

En la Figura 53 se observa que a menores valores de profundidad de corte axial (a_p) y avance por diente (f_z), las fuerzas de corte permanecen relativamente bajas sin importar las velocidades de giro de husillo (S) establecidas. Un efecto contrario se presenta al trabajar con profundidades de corte y avances altos, lo cuales tienden a incrementar las fuerzas resultantes a medida que se incrementa la velocidad de giro de husillo.

5.2 OBTENCIÓN DE LAS CONSTANTES ESPECÍFICAS DE CORTE

El manejo de un modelo mecánico para la predicción de fuerzas de corte, requiere de la obtención de los coeficientes específicos de corte mediante experimentación (operaciones de ranurado para este estudio), de tal forma que se caracterice la pareja herramienta-material a mecanizar [21]. El nombre de método semi-empírico lo recibe debido a que su aplicación también consta una parte analítica que involucra las características geométricas de la herramienta.

En el caso del fresado, este modelo permite predecir las componentes instantáneas de la fuerza de corte y su evolución durante el giro de la herramienta, mediante la integración de las fuerzas elementales en cada sección de filo en contacto con la pieza. Cabe resaltar que son muy pocos los modelos mecánicos desarrollados para

operaciones de micro-fresado y éstos no consideran los efectos del radio de filo, el espesor mínimo de viruta, la recuperación elástica y la dinámica de la herramienta, en conjunto [54]. Por lo tanto, para establecer la aplicabilidad del modelo de fuerzas empleado en esta investigación, se establecen valores de a_p que aseguren la generación del espesor mínimo de viruta durante las operaciones de ranurado.

Inicialmente se definen como tangencial, radial y la axial a las fuerzas de corte que actúan sobre un elemento infinitesimal del filo, sus expresiones se relacionan a continuación [77]:

$$\begin{aligned} dF_{t,j}(\phi_j, \kappa) &= K_{te}dS + K_{tc}h(\phi_j, \kappa)db \\ dF_{r,j}(\phi_j, \kappa) &= K_{re}dS + K_{rc}h(\phi_j, \kappa)db \\ dF_{a,j}(\phi_j, \kappa) &= K_{ae}dS + K_{ac}h(\phi_j, \kappa)db \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6}$$

Los coeficientes o constantes específicas de corte, están relacionados por un lado a la cizalladura del material (K_c) y por otro al rozamiento (K_e) del material. El término relativo a la cizalladura es multiplicado por la sección de viruta sin deformar y el rozamiento por la longitud de filo inmerso en el corte [21]. Al substituir en la ecuación 6, las expresiones para el espesor de viruta teórico y el diferencial de ancho de viruta, se obtienen los diferenciales de fuerza en función de la altura de filo (z) [77].

$$\begin{aligned} dF_{t,j}(\phi_j, z) &= K_{te}dS(z) + K_{tc}f_z \sin \phi_j dz \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) &= K_{re}dS(z) + K_{rc}f_z \sin \phi_j dz \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) &= K_{ae}dS(z) + K_{ac}f_z \sin \phi_j dz \end{aligned} \quad \text{Ecuación 7}$$

Estas expresiones se proyectan sobre los ejes de las direcciones de avance (eje X), normal (eje Y) y axial (eje Z), asociados a la herramienta [77]. Como se muestra a continuación:

$$\begin{Bmatrix} dF_{x,j}(\phi_j, z) \\ dF_{y,j}(\phi_j, z) \\ dF_{z,j}(\phi_j, z) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_j & -\sin \kappa \sin \phi_j & -\cos \kappa \sin \phi_j \\ \sin \phi_j & -\sin \kappa \cos \phi_j & -\cos \kappa \cos \phi_j \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dF_{t,j}(\phi_j, z) \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 8}$$

Las fuerzas de corte que actúan sobre el filo j , se obtienen con la integración para toda la profundidad de corte y las fuerzas totales se calculan mediante la suma de las contribuciones de todos los filos que se encuentran en contacto con el material [77].

$$F(\phi_j) = \sum_{j=1}^Z F_{.,j}(\phi_j) \quad \text{Ecuación 9}$$

Las operaciones de mecanizado experimentales se realizaron con dos avances por diente (f_z) por lo que se trabajará bajo la hipótesis de coeficientes de cizalladura y rozamiento constantes. En este caso, para cada a_p se resolverá un sistema de seis ecuaciones con seis incógnitas, como se describen [77]:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{xc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (-K_{tc} \sin \phi \cos \phi - K_{rc} \sin \kappa \sin^2 \phi - K_{ac} \cos \kappa \sin^2 \phi) dz d\phi \\ \tilde{F}_{yc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (K_{tc} \sin^2 \phi - K_{rc} \sin \kappa \sin \phi \cos \phi - K_{ac} \cos \kappa \sin \phi \cos \phi) dz d\phi \\ \tilde{F}_{zc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (K_{rc} \sin \phi \cos \kappa - K_{ac} \sin \phi \sin \kappa) dz d\phi \\ \tilde{F}_{xe} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (-K_{te} \cos \phi - K_{re} \sin \kappa \sin \phi - K_{ae} \cos \kappa \sin \phi) dS(z) d\phi \\ \tilde{F}_{ye} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (K_{te} \sin \phi - K_{re} \sin \kappa \cos \phi - K_{ae} \cos \kappa \cos \phi) dS(z) d\phi \\ \tilde{F}_{ze} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} (K_{re} \cos \kappa - K_{ae} \sin \kappa) dS(z) d\phi \end{aligned} \quad \text{Ecuación 10}$$

Para facilitar la aplicación de estas ecuaciones se emplearon códigos desarrollados en Matlab® por Pacheco [78], [79], se modificaron para la obtención de los coeficientes y la predicción de fuerzas en la escala de micro-fresado. En la Figura 54 se representa esquemáticamente la herramienta analizada y en la Tabla 16 se relacionan los parámetros ingresados para correr los programas de cálculo de coeficientes y predicción de fuerzas.

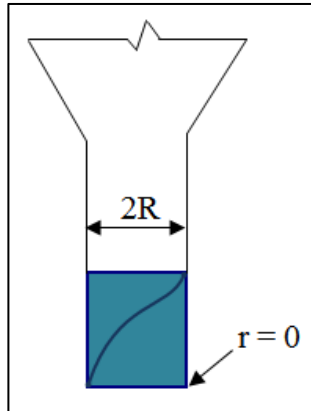


Figura 54. Geometría envolvente exterior de la herramienta cilíndrica

Tabla 16. Parámetros de entrada para el modelo de fuerzas

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad giro husillo (S)	75 000	rpm
Profundidad pasada (a_p)	80 - 160	μm
Avance por diente (f_z)	5 - 10	$\mu\text{m}/\text{diente}$
Diámetro (D)	0,2	μm
Radio (R)	0,1	μm
Ángulo de hélice (i_o)	30	$^\circ$
Número de dientes (z)	2	
Corte	1 - 0	

Los parámetros de corte como velocidad de husillo, profundidad y avance corresponden a combinaciones para las cuales se realizaron operaciones de mecanizado. El ángulo de hélice es proporcionado por el fabricante de la micro-herramienta y permanece constante. Debido al tipo de operación de mecanizado realizada, la variable ‘Corte’ puede ingresarse en cualquiera de los dos valores. Esto se debe a que al realizarse una operación de ranurado, la herramienta durante su recorrido trabajará en 1-concordancia (down-milling) y en 0-oposición (up-milling).

En la Tabla 17 se presentan los coeficientes de cizalladura y rozamiento encontrados para una operación de ranurado en PMMA biocompatible y con una herramienta de carburo de tungsteno de $\square 200 \mu\text{m}$.

Tabla 17. Coeficientes de corte

Coeficiente	Valor ($\times 10^3$)	Unidad
K_{tc}	1,1986	N/mm^2
K_{rc}	-1,0979	N/mm^2
K_{ac}	0,2360	N/mm^2
K_{te}	-0,0013	N/mm
K_{re}	0,0020	N/mm
K_{ae}	-0,0001	N/mm

A partir de la caracterización del binomio herramienta-material (coeficientes), se procede con la predicción de las fuerzas de corte para dos vueltas de una herramienta con las mismas características de material y geométricas e igual materia prima.

Las condiciones de corte para las que se realizó el cálculo corresponden a la combinación ap160-fz10-S75. Puesto que para estos parámetros de corte se han registrado y tratado las señales de fuerza adquiridas durante el proceso de mecanizado, es posible contrastar los resultados mediante gráficas en función de los grados de giro de la herramienta (*ver Figura 55*).

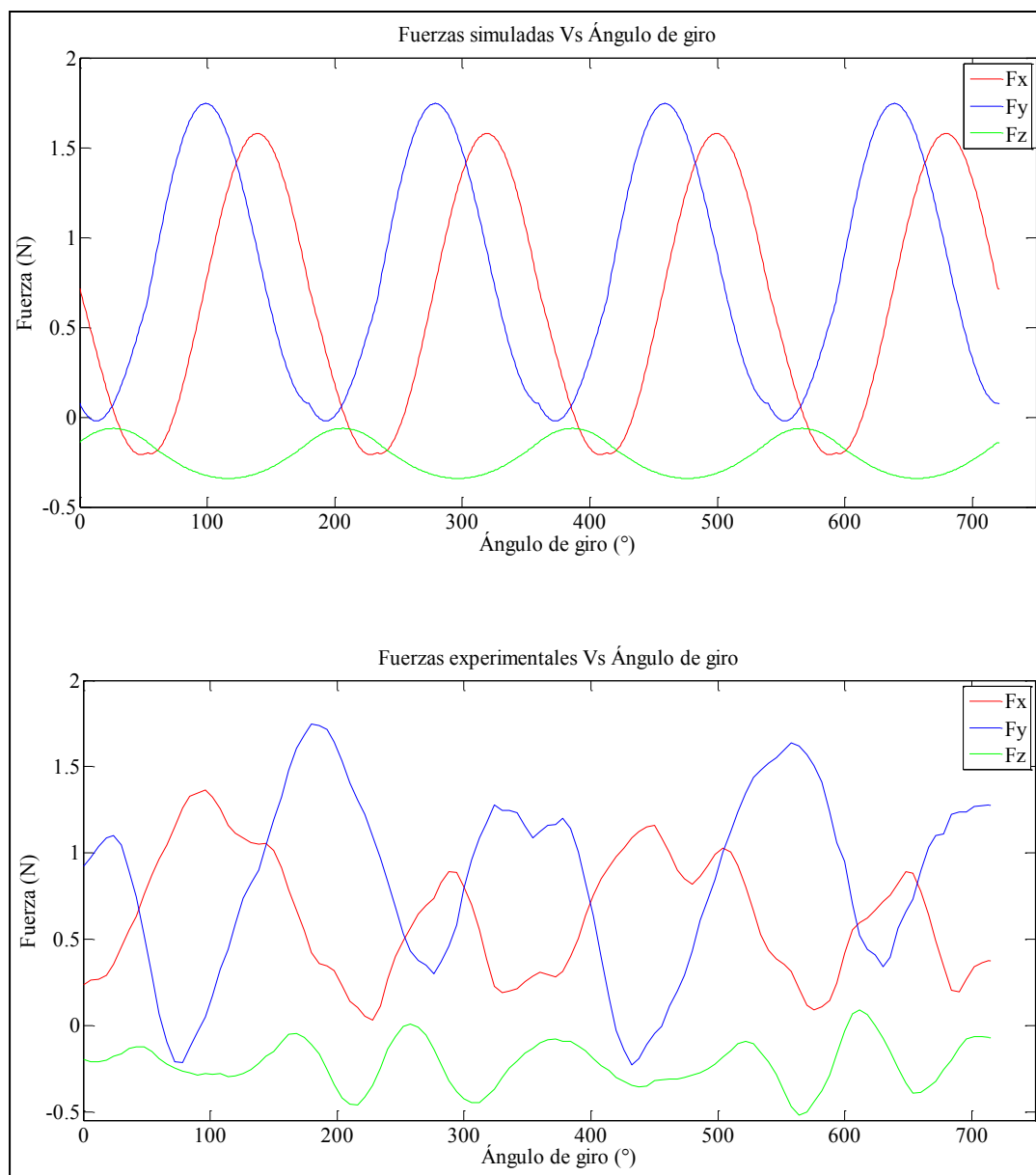


Figura 55. Fuerzas para dos vueltas de la herramienta, combinación ap160-fz10-S75.
Arriba: obtenidas con modelo de fuerzas. *Abajo:* obtenidas experimentalmente

Las curvas de la Figura 55 presentan un desfase entre la fuerza de avance y normal que puede ser ocasionado por el 'run-out' y deflexión de la herramienta. Al parecer el corte inicia en la dirección normal, es decir que uno de los dientes entra primero en contacto con el material en el eje Y. Sin embargo, al observar los valores límite de las fuerzas de corte, se tiene una muy buena aproximación entre las fuerzas establecidas experimentalmente y las calculadas mediante la aplicación del modelo. Por lo tanto, los coeficientes de corte encontrados pueden ser empleados para la proyección de

fuerzas de corte en operaciones que conserven las mismas características de herramienta y material.

Las fuerzas experimentales muestran que por efectos del 'run-out' y deflexión de la herramienta uno de los dientes corta más que el otro, por este motivo se presenta una diferencia de altura entre los picos. Se observan diferencias en la cinemática del proceso, ya que la curva experimental está desfasada con la proyectadas, esto puede deberse a que en la realidad, el corte inicia con un ángulo arbitrario.

5.3 RUGOSIDAD EN EL PISO DE LAS RANURAS

Uno de los parámetros que permite medir la calidad de una superficie mecanizada, es la rugosidad. En esta investigación se controló la rugosidad en el piso de las ranuras generadas mediante micro-fresado, empleando métodos no destructivos como el AFM y perfilometría confocal. En las Figura 56 se muestran algunas de las imágenes conseguidas mediante la aplicación de estas técnicas.

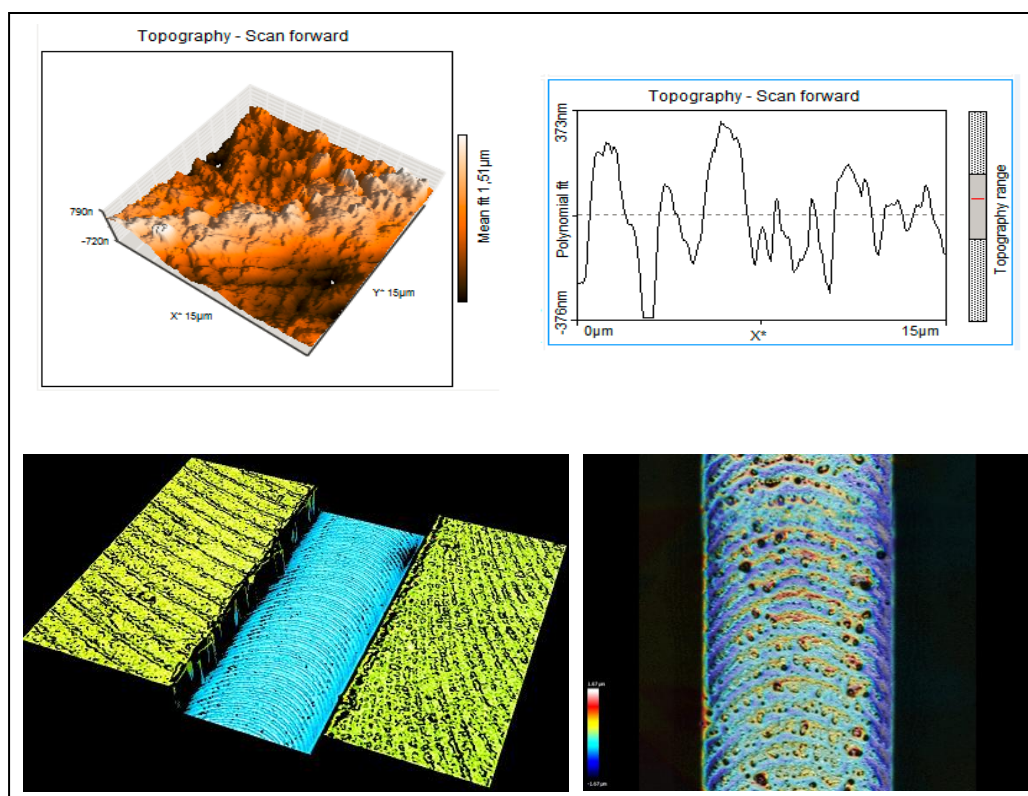


Figura 56. Medición de rugosidad. *Arriba:* técnica AFM. *Izquierda:* topografía 3D del piso de la ranura. *Derecha:* Perfil de rugosidad. *Abajo:* Mediante perfilometría confocal. *Izquierda:* topografía de las ranuras. *Derecha:* zoom de una zona

Con los resultados obtenidos se elaboró el diagrama de barras mostrado en la Figura 57, el cual permite establecer algunas relaciones entre los parámetros de corte y la rugosidad final en las ranuras.

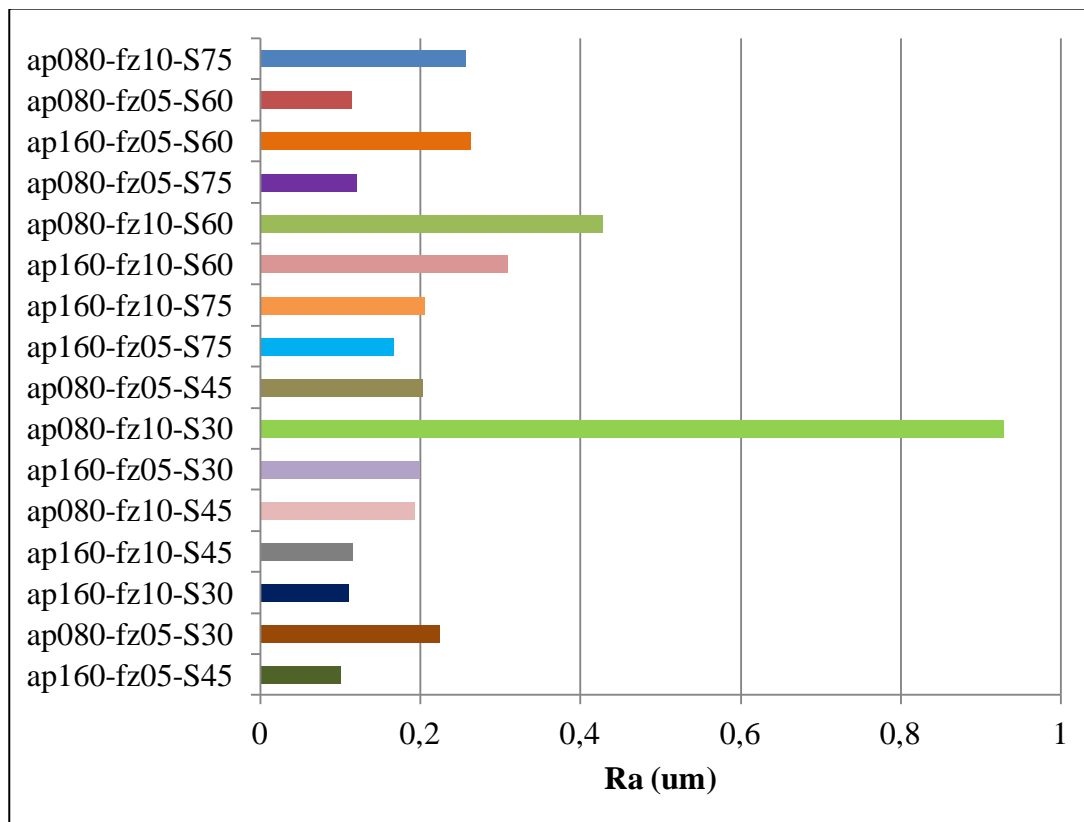


Figura 57. Rugosidad por combinación de parámetros

De lo anterior se observa que para las velocidades de giro de 30 krpm y 45 krpm, en el nivel bajo de profundidad de corte (80 μm) la rugosidad se incrementa. No se aprecia mayor influencia del avance por diente y al trabajar con el nivel de velocidad de giro de husillo más bajo (30 000 rpm) el valor de R_a tiende a aumentar.

En los niveles de velocidad de husillo de 60 krpm y 75 krpm, se hace más evidente el incremento del valor de rugosidad en el piso de las ranuras al trabajar con las profundidades de corte y avance por diente más altas (160 μm y 10 μm/diente, respectivamente). También se observa que al trabajar a 60 000 rpm, la rugosidad tiende a incrementar.

Se presentan un caso atípico con valor de rugosidad muy alto, en la combinación ap080-fz10-S30.

Con el propósito de encontrar una relación entre las fuerzas de corte (en este caso se tomó como referencia la fuerza de avance) y la rugosidad, se generó el esquema presentado en la Figura 58. Sin embargo, los datos se muestran dispersos y sin un patrón aparente, por lo tanto no se percibe conexión alguna entre los valores de rugosidad y la fuerza generada durante el mecanizado.

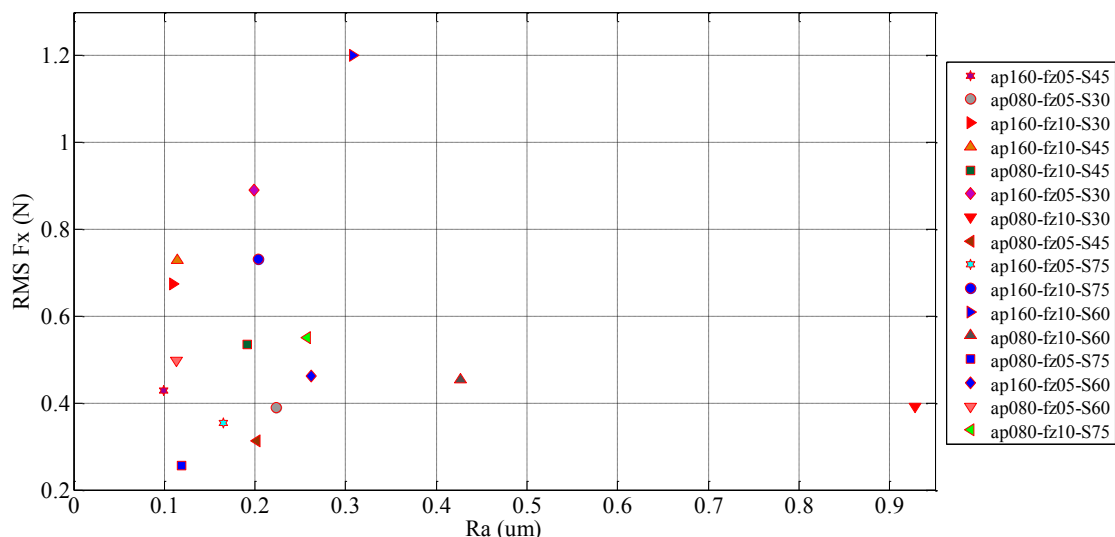


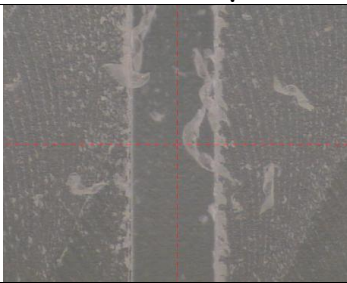
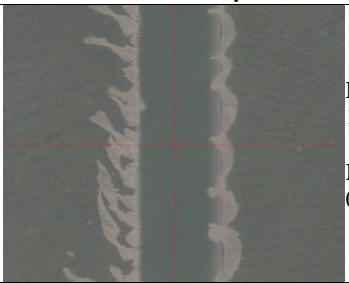

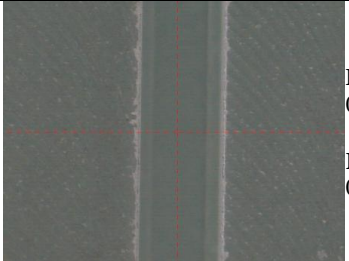

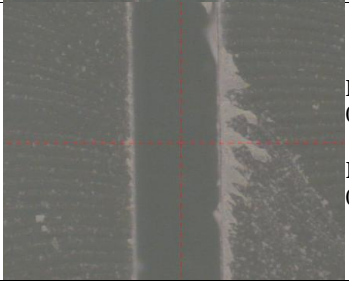

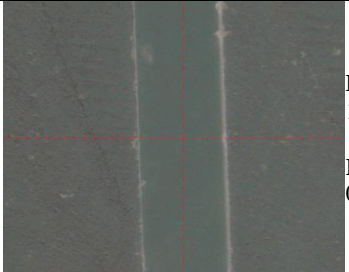
Figura 58. Gráfica: Rugosidad Vs. $FRMS_x$

5.4 FORMACIÓN DE REBABA DURANTE EL RANURADO

Para analizar los efectos de los parámetros del proceso en la formación de virutas y debido a que ésta es una variable de salida cualitativa, se generaron las Tabla 18 y Tabla 19. De esta forma se presenta una referencia visual de los resultados obtenidos, de acuerdo a profundidad de pasada (a_p), velocidad de giro de husillo (S) y avance por diente (f_z). Como complemento y con el propósito de utilizar posteriormente estos cuadros como guías de selección; se adiciona información sobre las fuerzas resultantes generadas ($FRMS$) y los resultados de rugosidad en el piso de las ranuras (R_a).

Para las imágenes presentadas en la Tabla 18, se puede inferir que a bajas velocidades de giro la cantidad y tamaño de rebaba se incrementa, al disminuir el avance; el efecto de la profundidad de corte es pequeño aunque al subirla se incrementa la generación de rebaba. A altas velocidades de giro, la rebaba aumenta al aumentar la profundidad de corte y que el efecto del avance es pequeño, aunque se observa una tendencia a disminuir al incrementarse el f_z .

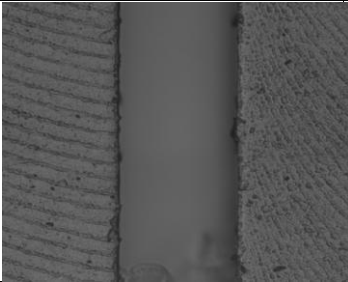


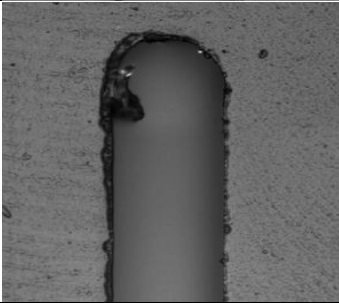




Tabla 18. Diagrama de rebabas. Combinaciones con S 30 krpm y 45 krpm (251,8x)

			Profundidad			
			80 μm		160 μm	
Velocidad	30 000 rpm		Avance	5 μm/diente	 <p>F_{RMS} (N): 0,6944</p> <p>Ra (μm): 0,223</p>	 <p>F_{RMS} (N): 1,3088</p> <p>Ra (μm): 0,199</p>
				10 μm/diente	 <p>F_{RMS} (N): 0,9029</p> <p>Ra (μm): 0,928</p>	 <p>F_{RMS} (N): 0,9692</p> <p>Ra (μm): 0,110</p>
	45 000 rpm			5 μm/diente	 <p>F_{RMS} (N): 0,6167</p> <p>Ra (μm): 0,202</p>	 <p>F_{RMS} (N): 0,7098</p> <p>Ra (μm): 0,099</p>
				10 μm/diente	 <p>F_{RMS} (N): 0,7186</p> <p>Ra (μm): 0,191</p>	 <p>F_{RMS} (N): 1,0509</p> <p>Ra (μm): 0,114</p>

La mayor formación de rebaba se presenta para la condición con la mayor profundidad de corte (160 μm), la menor velocidad de giro (30 000 rpm) y el menor avance (5 $\mu\text{m}/\text{diente}$). La menor formación de rebaba se observa para la combinación con menor profundidad de corte (80 μm), mayor velocidad de giro (45 000 rpm) y el mayor avance (10 $\mu\text{m}/\text{diente}$).

También se observa que el RMS de las fuerzas de corte resultantes, para las dos velocidades (30 krpm y 45 krpm) se incrementa con la mayor profundidad y avance. La rugosidad del piso de las ranuras aumenta al bajar la profundidad de corte aunque no se observa una relación fuerte con el avance.

Tabla 19. Diagrama de rebabas. Combinaciones con S 60 krpm y 75 krpm (20x)

				Profundidad	
				80 μm	160 μm
Velocidad	60 000 rpm	Avance	5 $\mu\text{m}/\text{diente}$	 <p>F_{RMS} (N): 0,8078</p> <p>Ra (μm): 0,113</p>	 <p>F_{RMS} (N): 1,2974</p> <p>Ra (μm): 0,262</p>
			10 $\mu\text{m}/\text{diente}$	 <p>F_{RMS} (N): 0,9881</p> <p>Ra (μm): 0,427</p>	 <p>F_{RMS} (N): 1,6011</p> <p>Ra (μm): 0,308</p>
	75 000 rpm	Avance	5 $\mu\text{m}/\text{diente}$	 <p>F_{RMS} (N): 0,6373</p> <p>Ra (μm): 0,119</p>	 <p>F_{RMS} (N): 0,8353</p> <p>Ra (μm): 0,165</p>
			10 $\mu\text{m}/\text{diente}$	 <p>F_{RMS} (N): 1,2375</p> <p>Ra (μm): 0,257</p>	 <p>F_{RMS} (N): 1,3790</p> <p>Ra (μm): 0,204</p>

De los resultados presentados en la Tabla 19 en el nivel bajo de velocidad de husillo, se tiene que la cantidad y tamaño de rebaba se incrementa con aumento del avance y la disminución de la profundidad, aunque el efecto de este último parámetro no se percibe muy marcado. Al trabajar en el nivel alto de velocidad de husillo, el comportamiento de la generación de rebaba, aumenta con en la mayor profundidad de corte y el efecto del avance no se evidencia relevante.

La mayor formación de rebaba se presenta para la condición con la menor profundidad de corte ($80\text{ }\mu\text{m}$), la menor velocidad de giro ($60\text{ }000\text{ rpm}$) y el mayor avance ($10\text{ }\mu\text{m/diente}$). La menor formación de rebaba se observa para la combinación con menor profundidad de corte ($80\text{ }\mu\text{m}$), mayor velocidad de husillo ($75\text{ }000\text{ rpm}$) y el menor avance ($5\text{ }\mu\text{m/diente}$). Adicionalmente, se presentó una condición que causó fractura de la herramienta durante el mecanizado a baja velocidad ($60\text{ }000\text{ rpm}$), alta profundidad ($160\text{ }\mu\text{m}$) y alto avance ($10\text{ }\mu\text{m/diente}$).

El RMS de las fuerzas resultantes en las velocidades manejadas (60 krpm y 75 krpm), aumenta al aumentar la profundidad y el avance. Siendo considerablemente mayor en las combinaciones de niveles altos. La rugosidad se incrementa al trabajar en los valores altos de profundidad de corte y avance por diente.

Se evidencia una importante disminución de las rebabas en los bordes de la ranura cuando se trabaja con los dos niveles de velocidad de husillo más altos (60 krpm y 75 krpm); sin embargo en una de las combinaciones, la herramienta se fracturó durante el proceso de corte. Por lo tanto, se recomienda que esta combinación de variables sea evitada en los procesos de mecanizado de PMMA biocompatible.

5.5 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

Para las combinaciones de parámetros que presentan mayor cantidad de rebaba en los bordes de las ranuras, se realizó un análisis FDT a los datos de fuerza capturados. De esta forma se verifica que las operaciones de ranurado se realizaron en corte estable, se descarta la presencia de chatter (vibración auto-excitada) y se identifica en qué casos se presentaron vibraciones forzadas.

Es importante aclarar que para la escala dimensional en la que se encuentran las herramientas de corte empleadas para esta investigación, en este momento no se cuenta con los equipos adecuados para establecer de forma experimental la frecuencia natural del útil de corte. Éste es el elemento más relevante para este estudio puesto que es el más susceptible a chatter o vibraciones forzadas. El centro de micro-mecanizado es infinitamente más rígido que la micro-fresa y la probeta de PMMA, inclusive en su espesor final es más gruesa que la herramienta.

Para el análisis de la señal de fuerza de avance F_x , se empleó el código desarrollado en Matlab® por Pacheco [80], con éste mismo programa se generaron la Figura 59 a Figura 62, que se muestran a continuación.

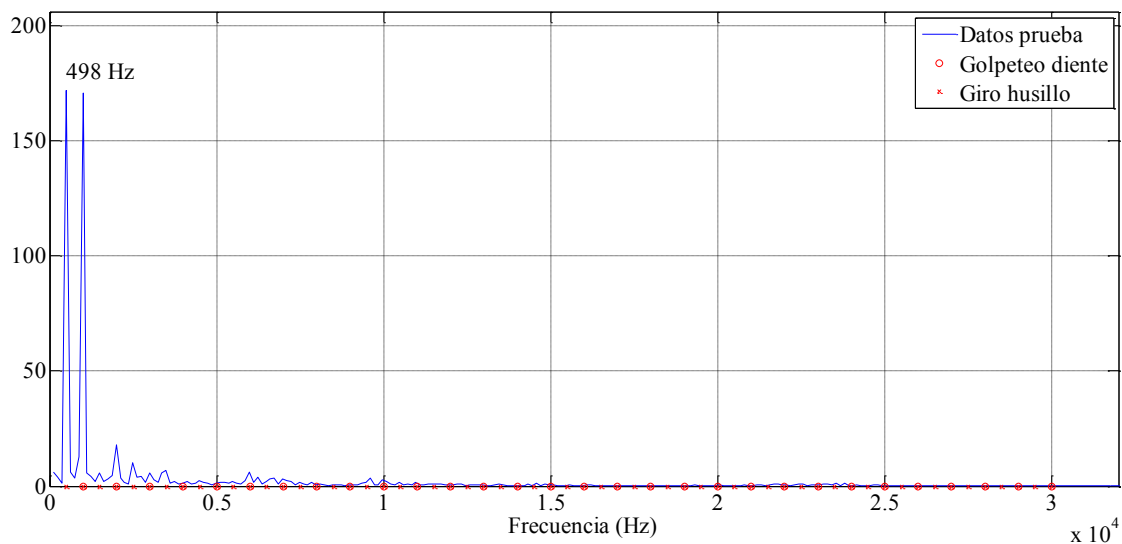


Figura 59. FDT combinación ap160-fz05-S30

Para los datos adquiridos con esta combinación de parámetros de corte, en la gráfica del análisis FDT se evidencia el efecto de *'run-out'* de la herramienta pero no se presenta chatter.

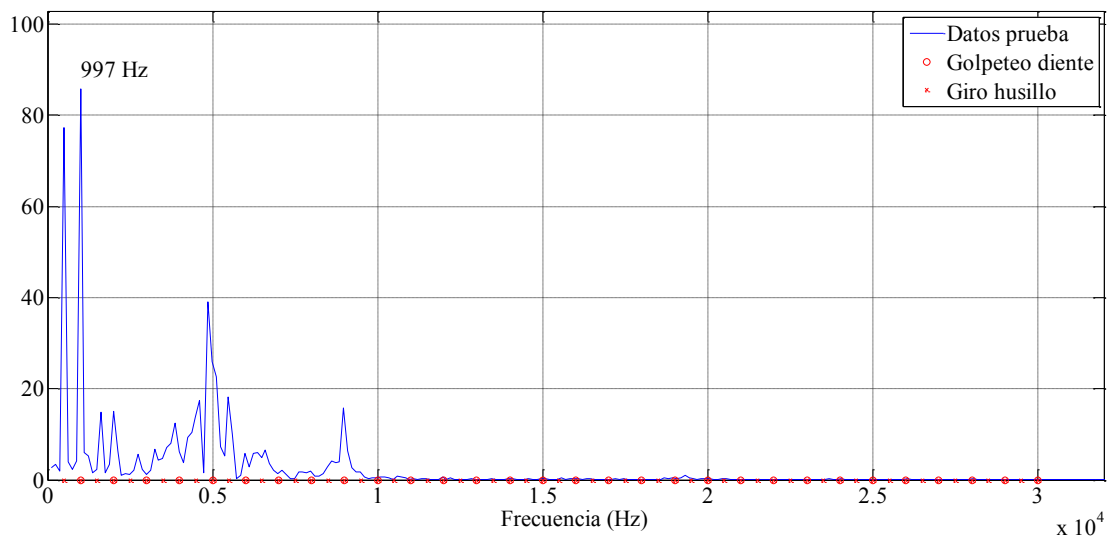


Figura 60. FDT combinación ap080-fz10-S30

En el análisis FDT de los datos capturados para esta combinación, se observa que domina la frecuencia de golpeteo del diente, también se presenta *'run-out'* de la herramienta. No se evidencia chatter.

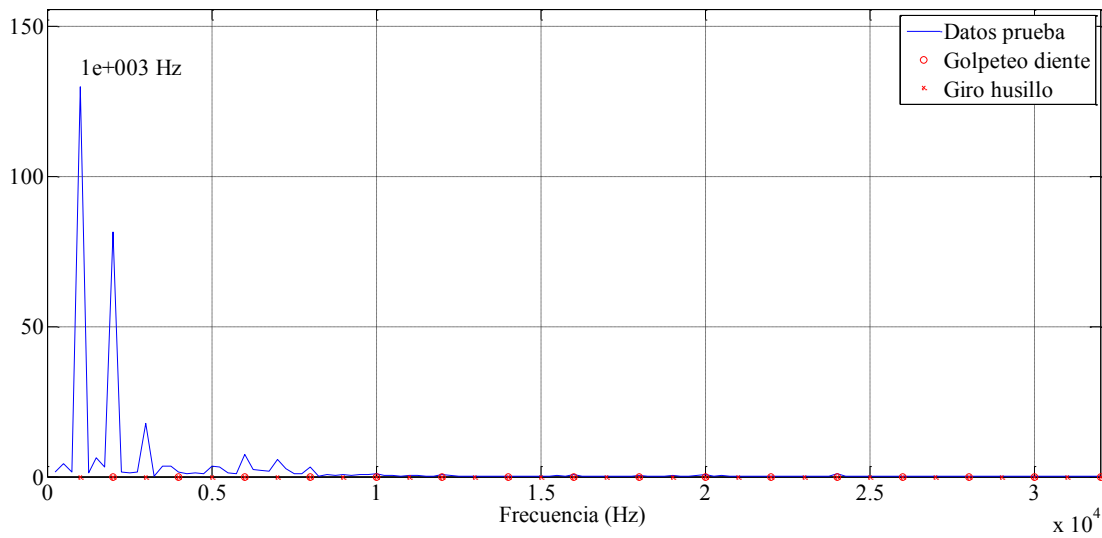


Figura 61. FDT combinación ap160-fz10-S60

Similar al análisis anterior, se evidencia efecto del '*run-out*' pero no chatter. El mismo razonamiento aplica para la siguiente combinación de factores (Figura 62).

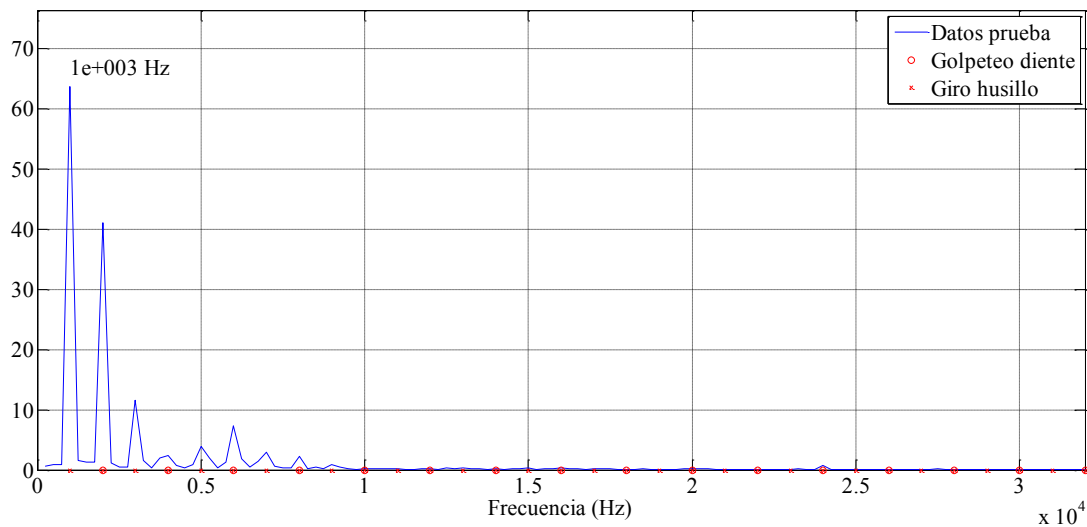


Figura 62. FDT combinación ap080-fz10-S60

En todos los casos se presenta coincidencia entre los picos de segundo orden y la frecuencia de golpeteo de la herramienta, esto indica que se presenta algo de vibración forzada debida al golpeteo del diente. Adicionalmente, la frecuencia dominante coincide con la frecuencia de golpeteo de la herramienta. De lo anterior, se puede establecer que las operaciones de ranurado se realizaron en corte estable.

5.6 VARIACIÓN DE R_e Y RADIO DE HERRAMIENTA

5.6.1 Variación de R_e

Para la obtención de los radios de filo (R_e) se realizaron dos tipos de mediciones de acuerdo a las características ofrecidas por los equipos disponibles. Con el equipo empleado en Ideko se generaron topografías de la arista de corte de las micro-fresas en la zona donde comienza la hélice, de esta forma se obtuvieron perfiles perpendiculares a la arista de corte para medir el radio de las aristas. En el equipo de Uninorte se realizaron mediciones de las proyecciones de las aristas de corte. Ambos métodos proporcionaron resultados similares para la caracterización de la herramienta (ver Tabla 14).

En la Figura 63 se presentan algunas de las imágenes obtenidas mediante perfilometría 3D de un radio de filo de una micro-fresa nueva y el perfil del diente generado para su medición.

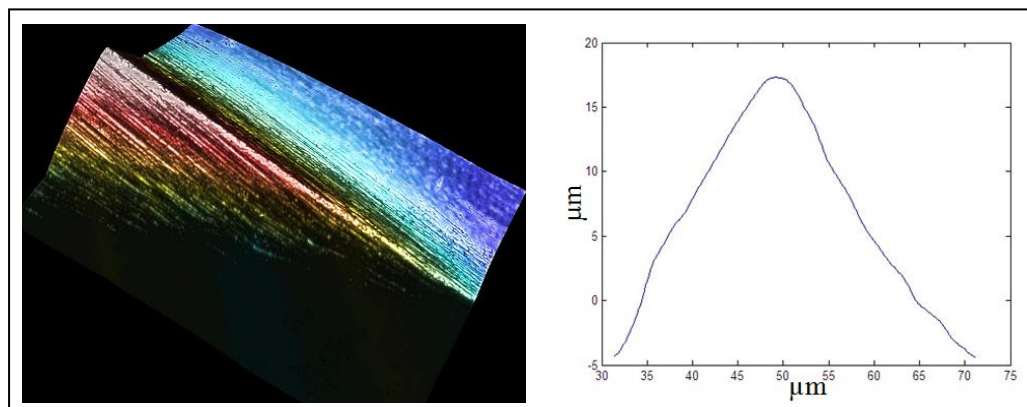


Figura 63. Medición de R_e antes de mecanizar. *Izquierda:* Imagen 3D de la arista de corte. *Derecha:* perfil para la medición del radio de filo

Para el análisis de la evolución del radio de filo, debido a la complejidad de la medición de esta característica por su tamaño, posición y adhesión del material después del mecanizado. Se tomó una muestra representativa de herramientas que permite identificar lo que sucede con el R_e de las micro-herramientas al mecanizar PMMA biocompatible. En la Figura 64 se presentan las mediciones de algunos radios de filo antes y después de las operaciones de ranurado.

Se observa que los cambios ocurridos en el R_e de la herramienta son casi imperceptibles en la mayoría de los casos. Sin embargo se observa que las combinaciones de parámetros que presentaron una generación de rebabas significativa en el borde de las ranuras, también muestran un mayor aumento del radio de filo. El factor principal para el fallo de la herramienta en este caso se puede

asociar entonces al incremento del diámetro de la herramienta, mas no en el radio de filo. Sin embargo, el efecto de este último continúa asociado de cierta forma al sostenimiento de las características de calidad superficial como lo son la generación de rebabas y la rugosidad superficial.

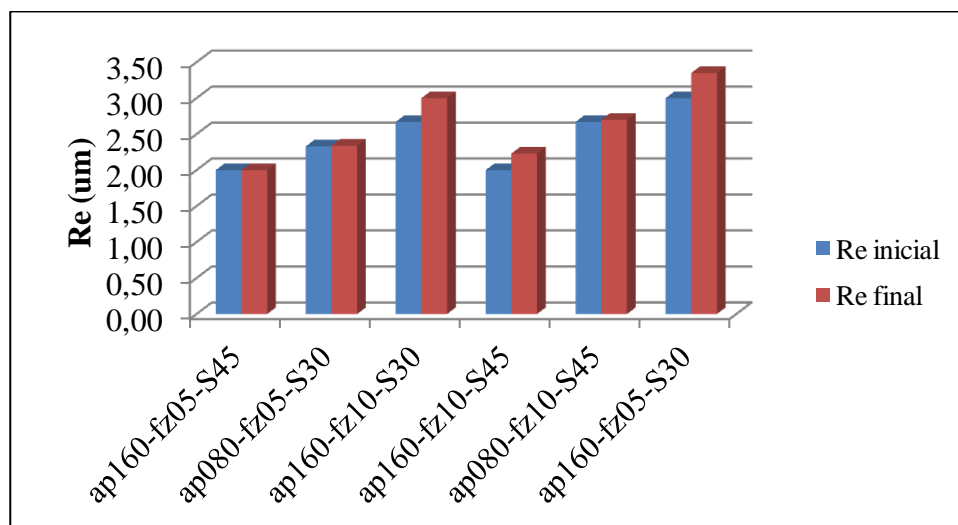


Figura 64. Gráfica: Combinación parámetros Vs. Evolución de R_e

5.6.2 Variación del radio de herramienta

Las herramientas (usadas) inspeccionadas visualmente muestran que durante el proceso de corte, parte del material removido se va adhiriendo al cuerpo de la herramienta. En las Figura 65 y Figura 66 se presentan fotografías de herramientas antes y después de mecanizar. Se observa claramente la acumulación de material en el cuerpo de la herramienta que se encuentra en contacto con él. La adherencia del PMMA se presenta independiente del uso de aire comprimido como medio de refrigeración.

En una de las combinaciones de parámetros (ap160-fz10-S60) se presentó fractura súbita de la micro-herramienta. Debido a que no es posible detectar instantáneamente el momento en que ocurre la falla, el proceso de ranurado continuó hasta el siguiente control realizado por el láser. En todos los casos, excepto en este debido a la fractura, se observa acumulación de material en la punta de la herramienta, en mayor escala al trabajar en los niveles altos de profundidades de corte y avance por diente. La aplicación de ultrasonido posterior al mecanizado puede, en algunos casos remover un poco el material depositado, sin embargo la aplicación de este proceso puede ocasionar la ruptura de la herramienta. Es importante recordar que en esta escala de trabajo, cualquier operación que requiera la manipulación del útil de corte, puede dañarlo.

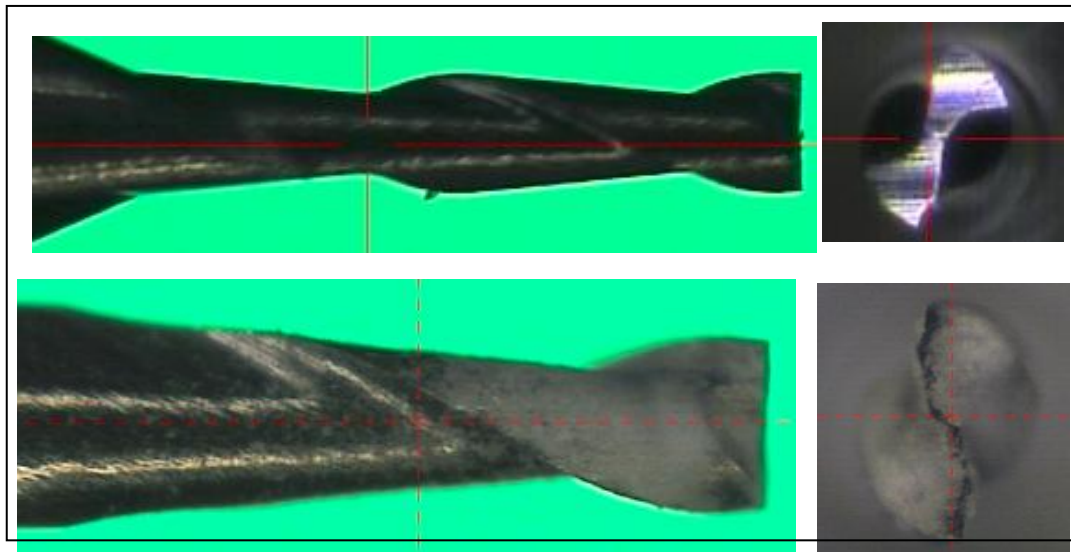


Figura 65. Fresa \square 0,2 μm empleada en combinación ap160-fz10-S45. Arriba: nueva (i-125x; d-187,7x). Abajo: usada (i-217,9x; d-375,5x). Ver Tabla 13

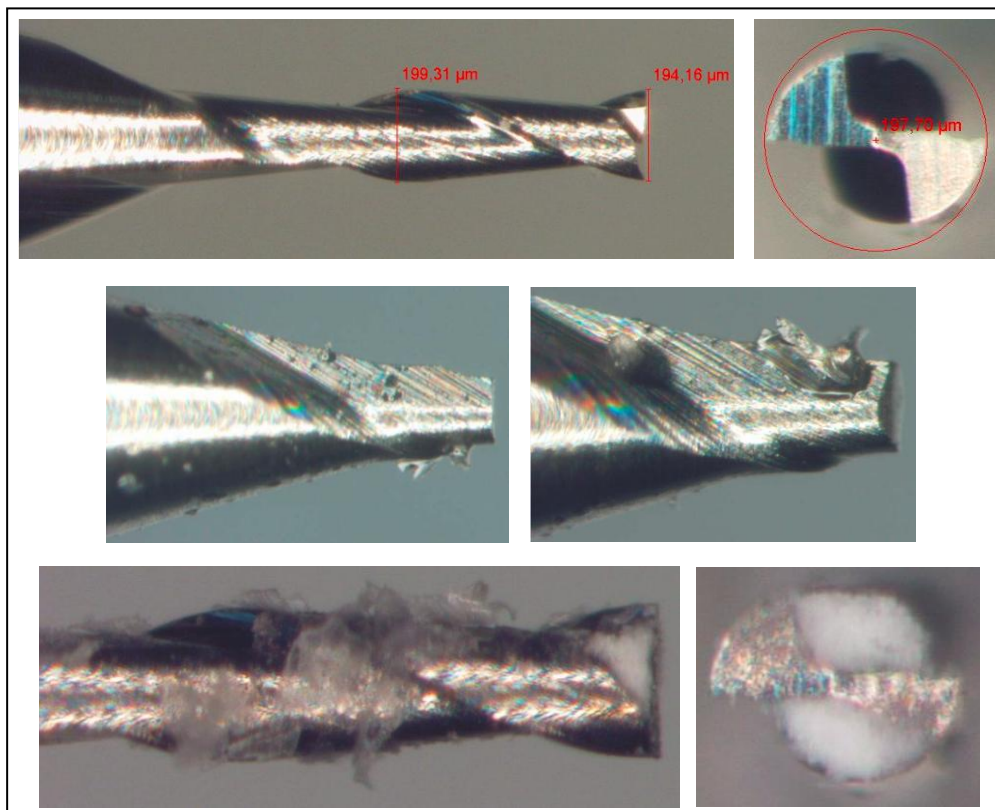


Figura 66. Fresa \square 0,2 μm . *Arriba:* nueva (i-63x; d-90x). *Centro:* usada en combinación ap160-fz10-S60 (i-40x; d-63x). *Abajo:* usada en combinación ap080-fz10-S60 (i-63x; d-90x). *Ver Tabla 13*

Con el propósito de monitorear el cambio que la acumulación de material puede causar en las dimensiones (diámetro) de la micro-herramienta se realizaron controles off-line con el láser. Para esto, se adicionaron ciclos de medición en el código de mecanizado; antes de iniciar el corte para determinar la medida inicial de cada fresa y al finalizar cada tanda de 13 ranuras, es decir, cada vez que la herramienta recorrió 130 mm. Con los datos adquiridos se construyeron gráficas que explican mejor los cambios sufridos por la herramienta y permiten a su vez establecer una relación entre el diámetro de la micro-fresa y el comportamiento de las fuerzas de corte.

En la Figura 67 y Figura 68 se grafican los cambios sufridos por el radio de la herramienta durante el mecanizado de cada probeta y en la Figura 69 a Figura 71 se grafican fuerzas de avance y normal de las combinaciones que presentaron un comportamiento especial. Siendo estos, fuentes de información relevante para este estudio.

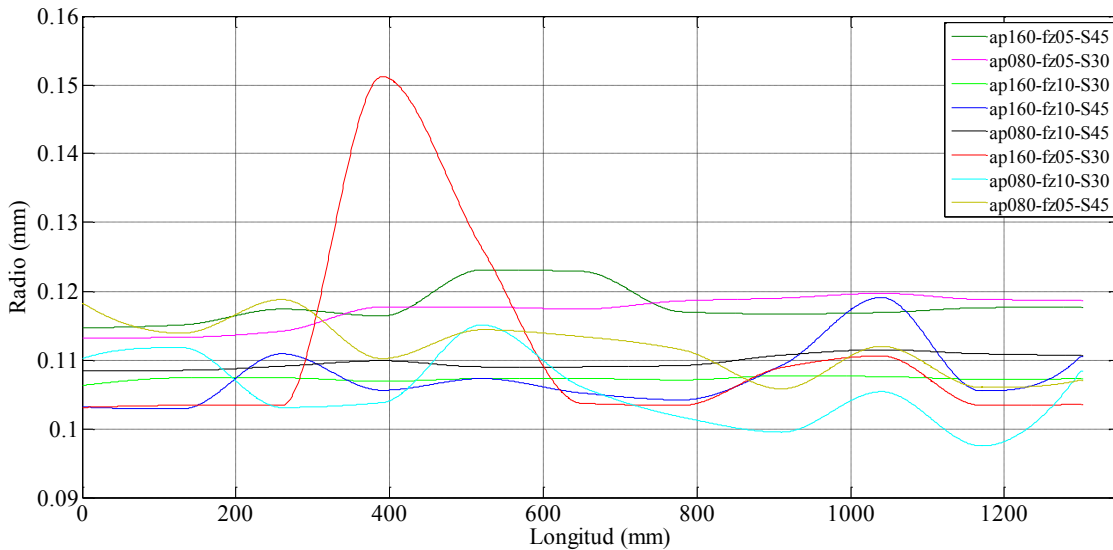


Figura 67. Gráfica: Longitud recorrida Vs. Radio de herramienta. *Ver Tabla 13*
(combinaciones con S a 30 krpm y 45 krpm)

En la mayoría de las combinaciones de parámetros en los niveles ‘bajos’ de velocidad el radio de las micro-fresas permanece entre 0,10 μm y 0,12 μm . No se presentó fractura de alguna micro-herramienta. Sin embargo, se observan casos atípicos en algunas de las combinaciones, en los que se presenta un mayor incremento del radio de la micro-herramienta y a su vez un incremento de las fuerzas de corte; como se muestra en la Figura 69.

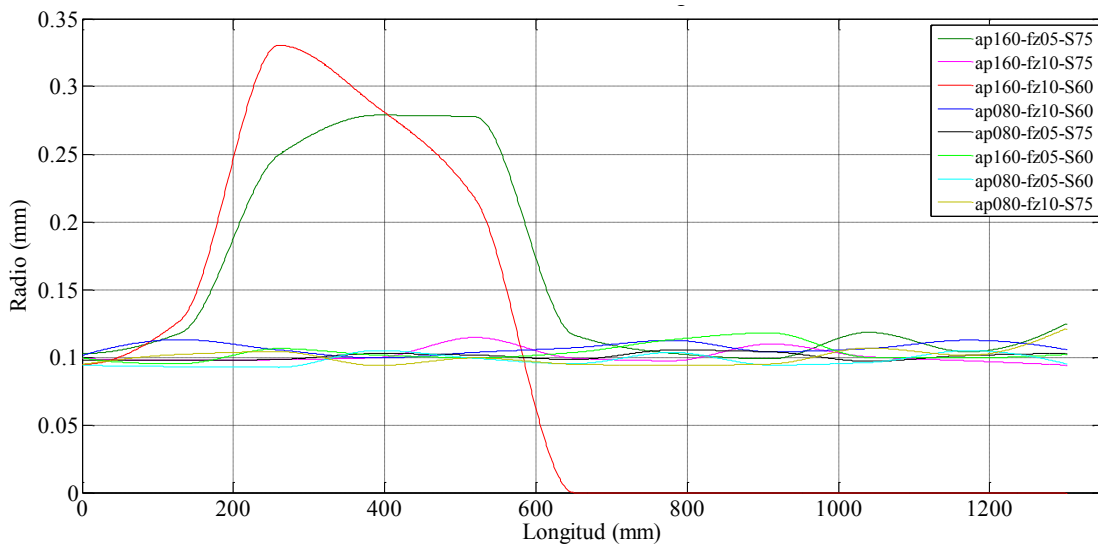


Figura 68. Gráfica: Longitud recorrida Vs. Radio de herramienta. *Ver Tabla 13*
(combinaciones con S a 60 krpm y 75 krpm)

Para las combinaciones a ‘altas’ velocidades se observa un comportamiento similar en el rango de incremento del radio de las herramientas. Sin embargo, las combinaciones ap160-fz05-S75 y ap160-fz10-S60 presentan un comportamiento particular. En la primera, se observa un incremento del radio de la herramienta en aproximadamente un 250%; mientras que en la segunda el radio alcanza hasta un 350%, provocando la fractura.

El incremento del primer caso se produce de forma gradual y a pesar de que incrementa las fuerzas de corte, la herramienta pierde material cerca de los 600 mm de longitud recorrida, en este punto en la Figura 70 se observa que la fuerza disminuye un poco. Pero conserva su tendencia a incrementar. En el segundo caso la herramienta aumenta su tamaño aceleradamente, de tal forma que pierde la capacidad de recuperarse o de reducir su tamaño; de igual forma las fuerzas se incrementan rápidamente, hasta que finalmente se fractura. La señal de fuerza de avance y normal para esta combinación se muestra en la Figura 71.

Se observa que en todos los casos, el incremento del radio de la herramienta está asociado a un incremento gradual de las fuerzas de corte (*ver Figura 69*). También se aprecia que, a partir de que la herramienta comienza a sufrir cambios en su radio, las fuerzas de corte comienzan a incrementarse. Adicionalmente, se nota que una vez la herramienta ha perdido su dimensión original no es posible que la recupere. Es decir que la cantidad de material adherido puede reducirse por efectos del proceso de corte

pero no en su totalidad. En algunos casos al disminuir el diámetro la fuerza se reduce un poco, pero en el siguiente cambio crecerá nuevamente (ver Figura 70).

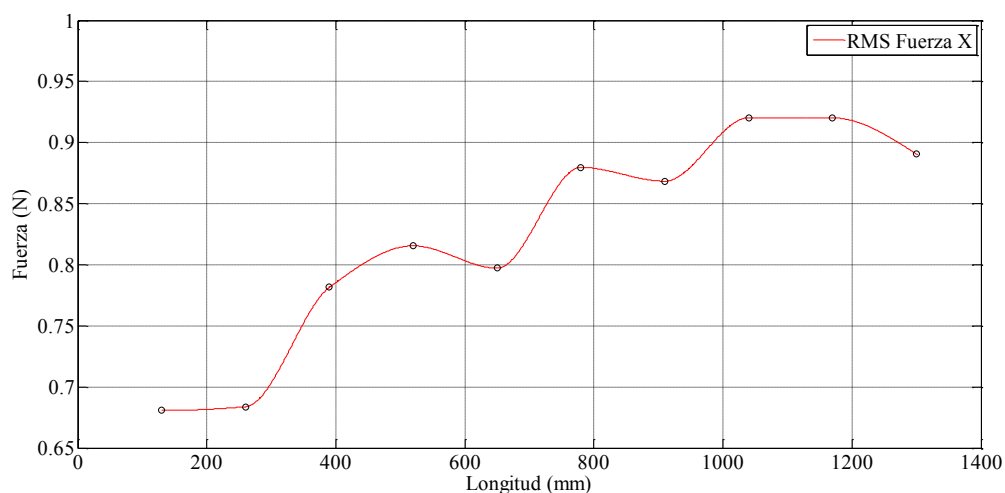


Figura 69. Gráfica: Longitud Vs. $FRMS_x$. Combinación ap160-fz05-S30

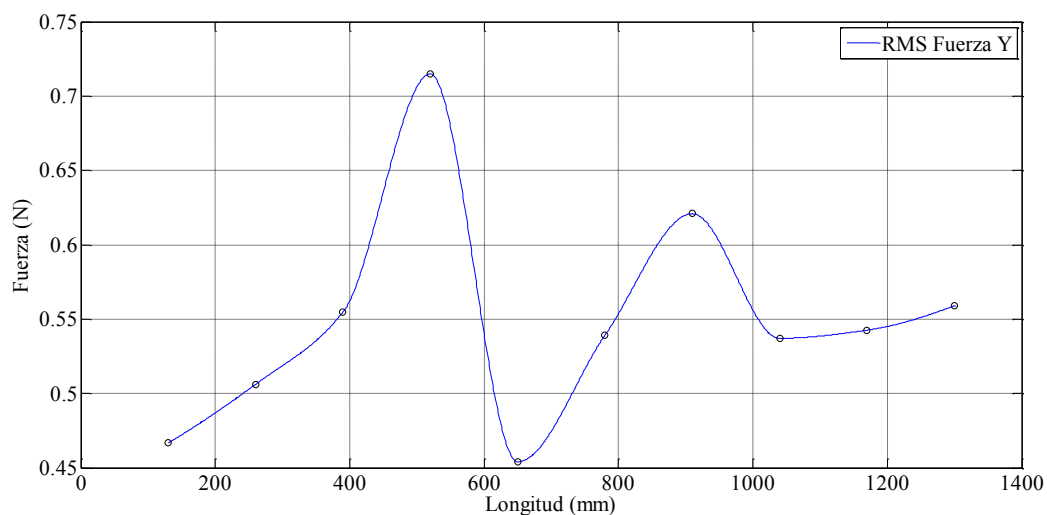


Figura 70. Gráfica: Longitud Vs. $FRMS_y$. Combinación ap160-fz05-S75

Una consecuencia directa de este aumento de geometría en la calidad final de la pieza fabricada, es la generación de rebabas en la superficie mecanizada, como se puede ver en la Tabla 18. Las combinaciones que generaron un mayor cambio en el diámetro de la fresa, también presentaron mayor cantidad y tamaño de rebabas en el borde de las ranuras.

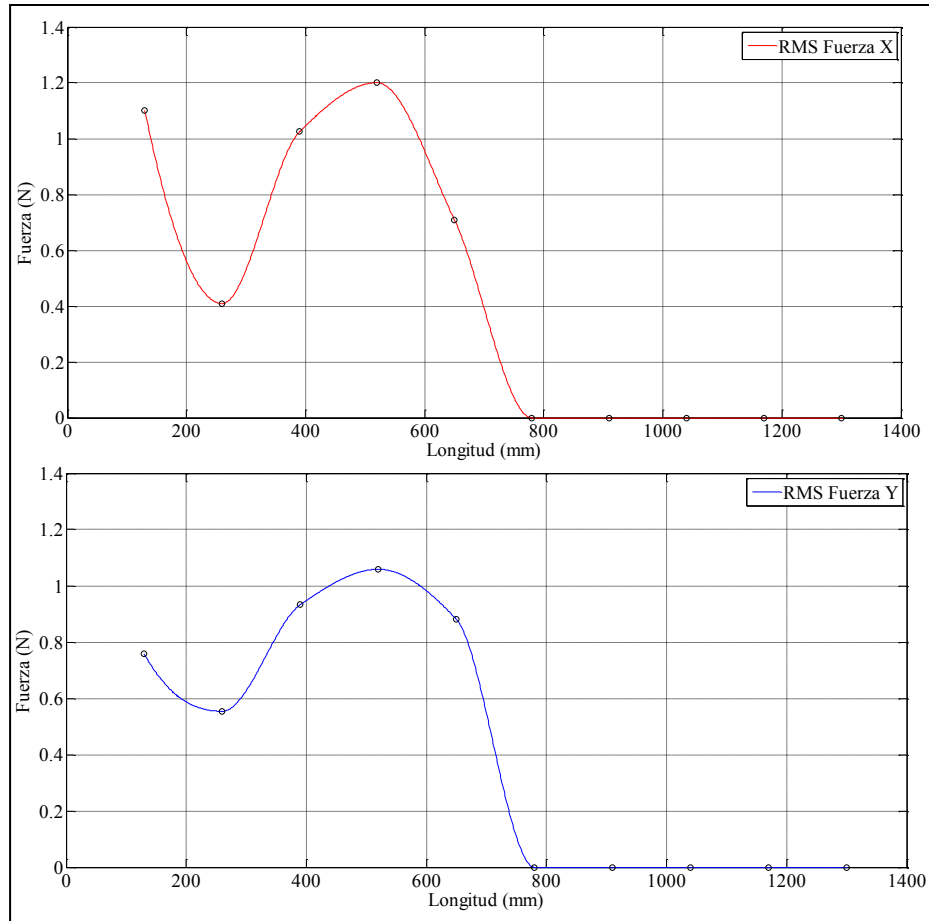


Figura 71. Gráfica: Longitud Vs. FRMS_x - FRMS_y. Combinación ap160-fz10-S60

5.7 TENDENCIA DE FUERZAS DE CORTE SEGÚN a_p Y f_z

En las siguientes figuras (Figura 72 a Figura 75) se presentan los comportamientos de las fuerzas generadas en las direcciones de avance y normal con relación a la profundidad de corte y avance por diente. Las gráficas se agrupan según la velocidad de giro. Estos esquemas pueden ser empleados conjuntamente con las Tabla 18 y Tabla 19 como lineamientos de selección de parámetros de corte.

En la Figura 72 se observa un incremento en las fuerzas de avance y normal al trabajar en el nivel alto de profundidad de corte y avance bajo. Al parecer en el nivel bajo de profundidad la influencia del avance no es muy marcada.

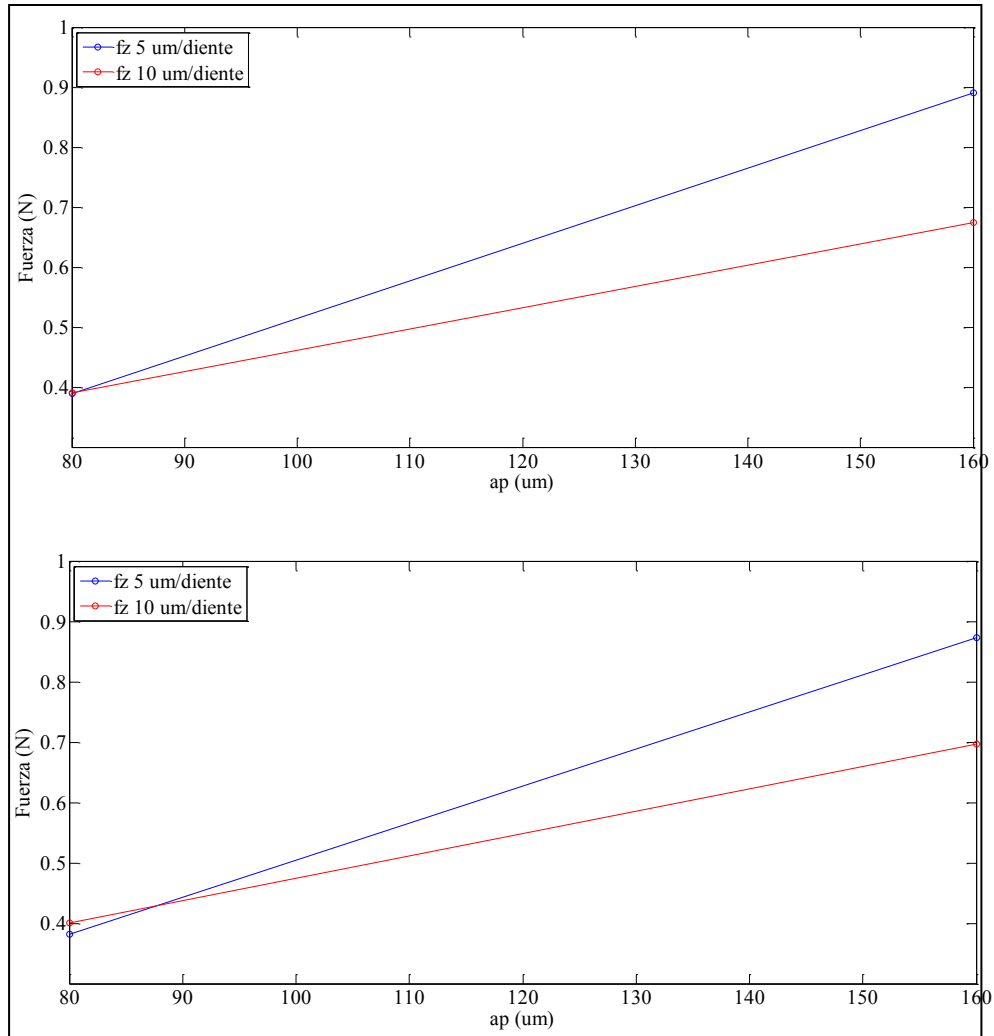


Figura 72. Comportamiento FRMS Vs. a_p (S: 30 krpm). *Arriba:* $FRMS_x$ Vs. a_p .
Abajo: $FRMS_y$ Vs. a_p

Para niveles altos de profundidad de corte axial y avance, se evidencia en la Figura 73 un incremento de las fuerzas generadas en la dirección de avance y normal.

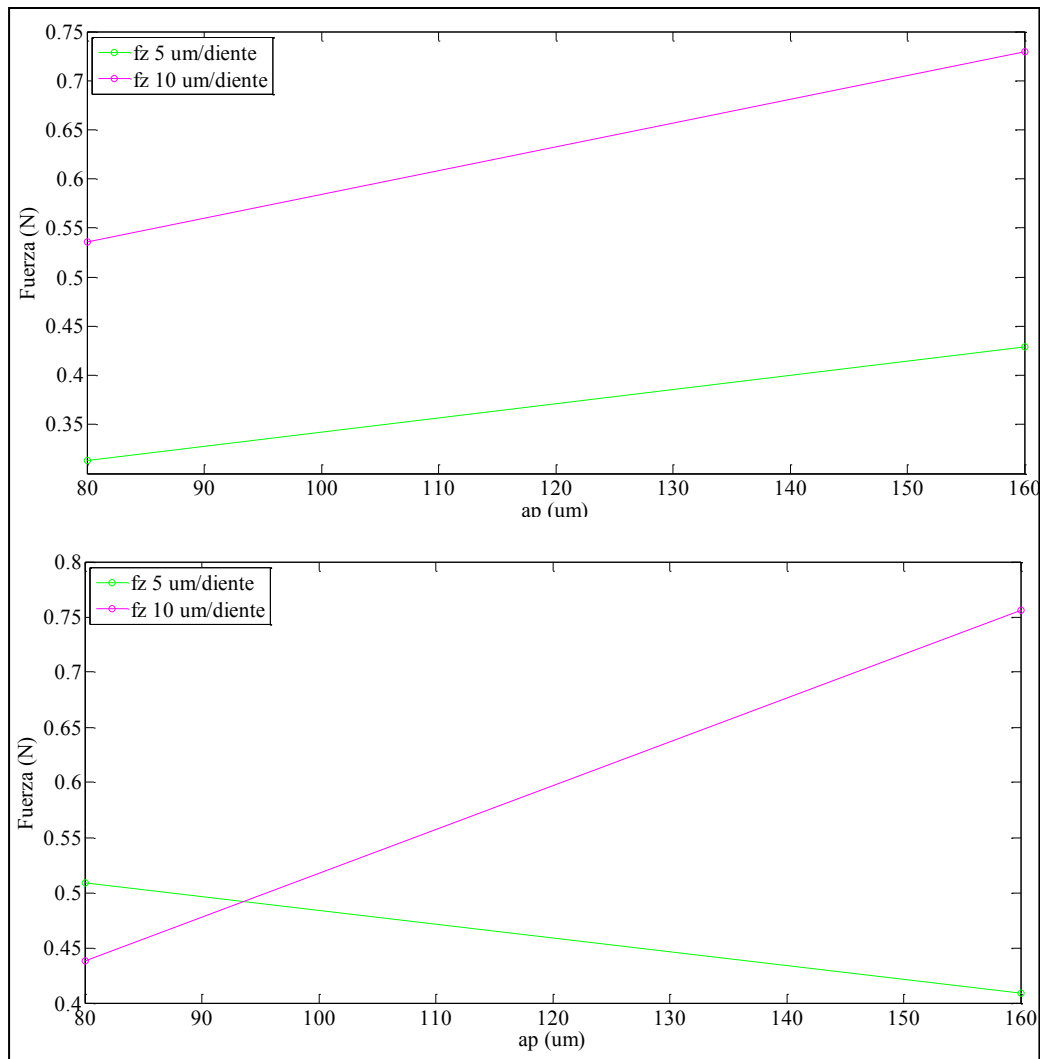


Figura 73. Comportamiento FRMS Vs. a_p (S: 45 krpm). *Arriba:* $FRMS_x$ Vs. a_p .
Abajo: $FRMS_y$ Vs. a_p

Para una velocidad de giro de 60 krpm y como se muestra en la Figura 74, las fuerzas tanto en la dirección de avance como normal alcanzan valores superiores a 1 N al trabajar con los niveles de profundidad y avance altos. Sin embargo se presenta relativamente estable al trabajar con el nivel bajo de avance por diente.

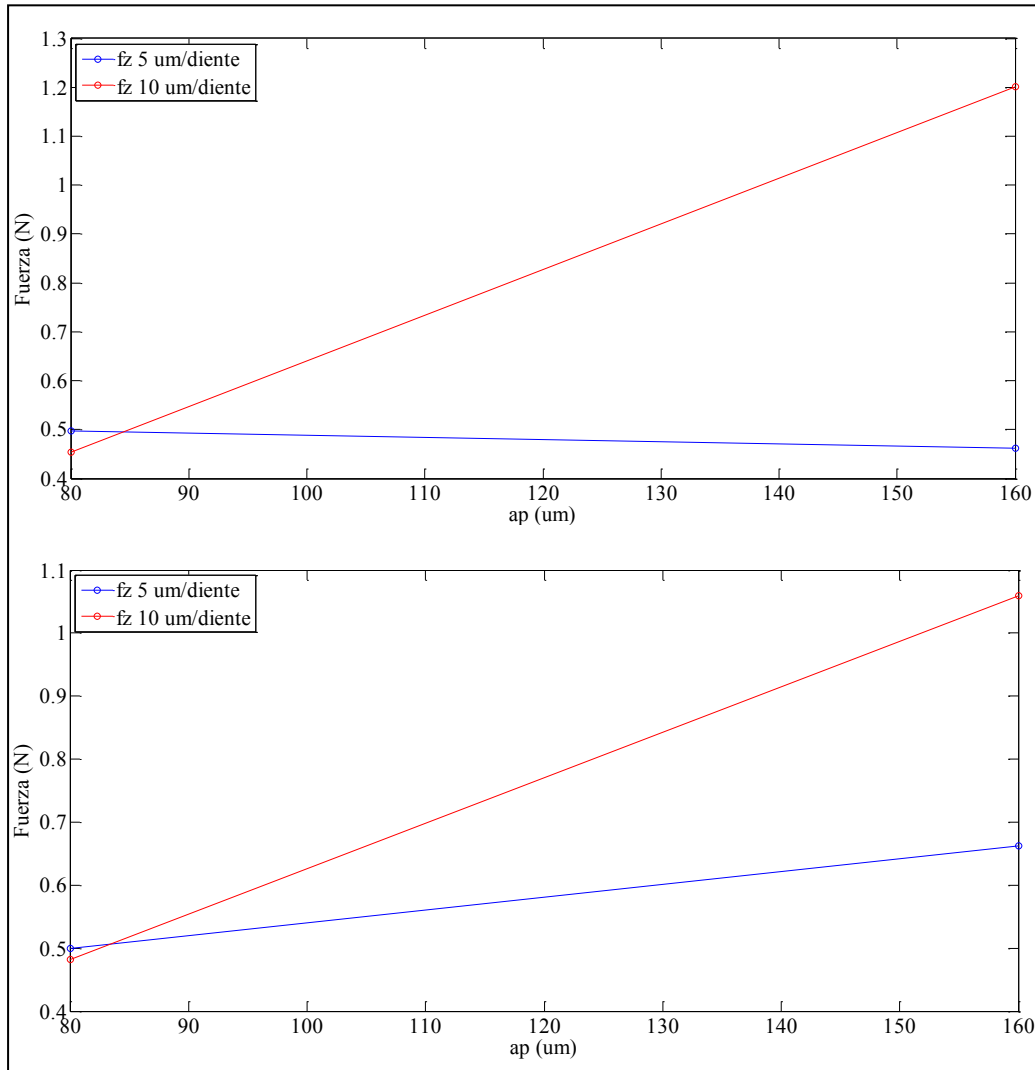


Figura 74. Comportamiento FRMS Vs. a_p (S: 60 krpm). *Arriba:* FRMS_x Vs. a_p .
Abajo: FRMS_y Vs. a_p

En la Figura 75 se observa un aumento de las fuerzas de corte al trabajar en los niveles superiores de avance y profundidad.

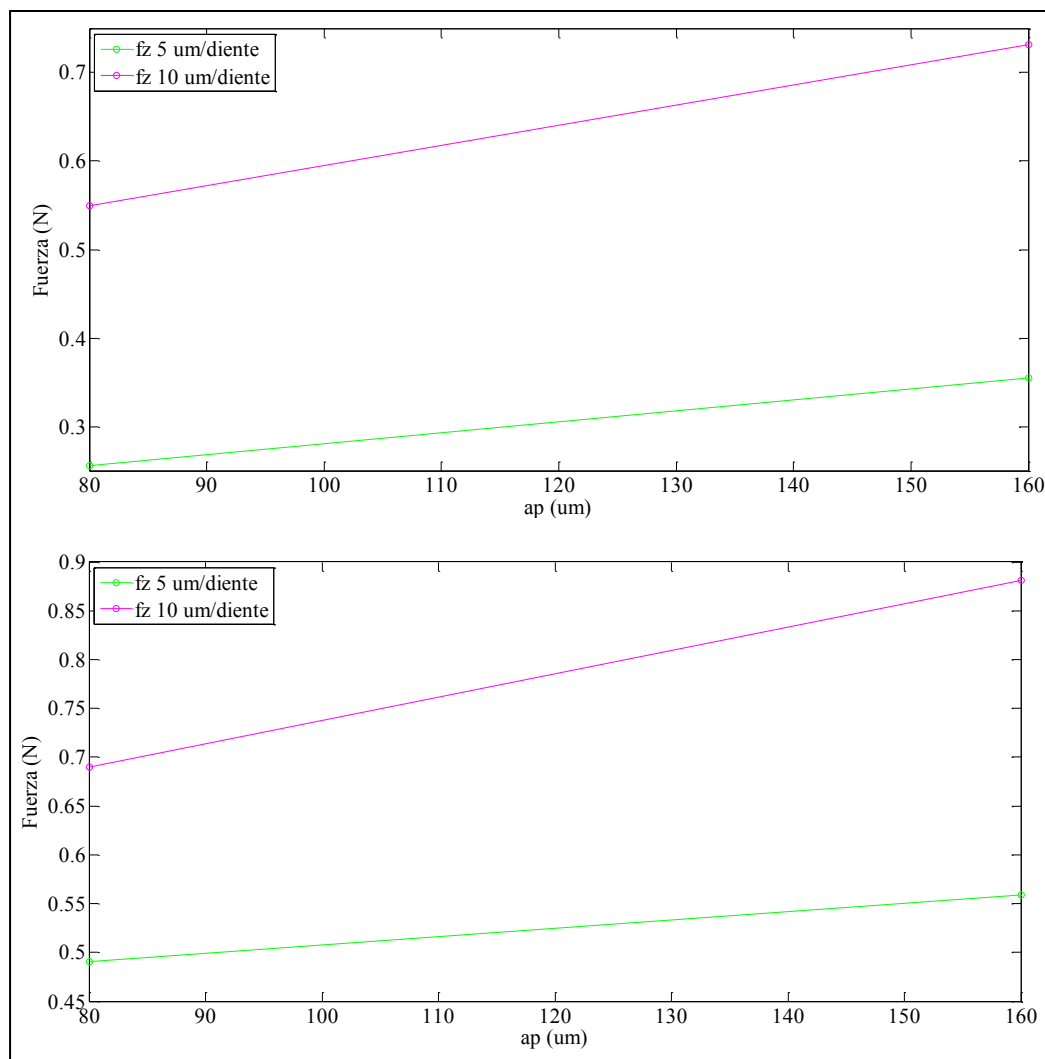


Figura 75. Comportamiento FRMS Vs. a_p (S: 75 krpm). *Arriba:* FRMS_x Vs. a_p .
Abajo: FRMS_y Vs. a_p

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

De las pruebas de micro-mecanizado realizadas sobre PMMA y el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En el mecanizado de PMMA biocompatible, el aire comprimido no actúa específicamente como un medio de enfriamiento sino como un elemento auxiliar para la evacuación de viruta. Adicionalmente, se verificó que su efecto sobre la cantidad de material que se adhiere a la herramienta es mínimo.
- Cuando comienza a adherirse material en el diámetro de la micro-herramienta se evidencia un daño acumulativo de la misma. Incluso al perder parte de este material en el siguiente proceso de corte, no recupera su condición inicial y las fuerzas de corte siguen aumentando.
- Es posible realizar un control del estado de la vida útil de las micro-herramientas en función del cambio sufrido en su radio. Mediante la utilización de sistemas de medición off-line (equipo de medición láser) se puede identificar la condición de falla con la evolución del diámetro. Con este método se evita la manipulación de la micro-herramienta fuera de la máquina y por consiguiente la pérdida de sus parámetros iniciales. De acuerdo a los valores de seguridad encontrados en esta investigación se pueden establecer, en la librería de herramientas de la máquina, los límites en los cuales la máquina mostrará un aviso de herramienta desgastada y la pondrá fuera de uso. Con estas medidas se tendrán ahorros significativos en tiempo de fabricación, materia prima y herramientas. Adicionalmente, al no requerir desmontar la herramienta para su verificación se asegura la misma precisión en la pieza durante todo el proceso de fabricación.
- Los valores netos de fuerza registrados durante los procesos de mecanizado y el comportamiento del radio de la herramienta permiten establecer que para valores de fuerza de avance y/o normales superiores a 1 N, la herramienta se encontrará próxima a la falla. Por este motivo, el incremento del diámetro de la herramienta no debe superar el 25% del valor del radio; de esta forma es factible que la micro-fresa recupere un diámetro cercano a su valor original y por lo tanto, la fuerza no se incrementará rápidamente.
- De los resultados obtenidos se puede establecer que una micro-fresa se catalogará como semi-usada cuando su radio presente incrementos entre el 1% y 15% de su valor de referencia (herramienta nueva), mientras que para incrementos entre el 16% y 20% la herramienta debe ser clasificada como usada. En este último caso, la recomendación es cambiar la herramienta para evitar fractura súbita durante el proceso y las consecuencias negativas que esto tiene sobre la calidad de la fabricación.

- Del monitoreo constante de las fuerzas de corte se ha podido establecer que tanto la componente normal de la fuerza como la de avance aumentan con el desgaste de la herramienta. Esta correlación es bastante similar en la mayoría de experimentos realizados (ver Tabla 15). Esto permite comprobar experimentalmente el modelo propuesto por Tansel y Bao [21].
- La utilización del modelo mecanístico para la predicción de fuerzas de corte, proporciona una aproximación bastante confiable de los valores que se podrán esperar en un proceso real de micro-fresado de PMMA biocompatible. El pequeño desfase presentado puede ser causado por el 'run-out' de la herramienta y el ángulo de inicio del proceso de corte.
- De los experimentos realizados y las señales de fuerza capturadas se observa que al trabajar con valores bajos de profundidad de corte axial (a_p) y avance por diente (f_z), el comportamiento de las fuerzas de corte permanecen relativamente estable y con valores bajos, independiente de la velocidad de giro de husillo (S). El efecto contrario se observa al mecanizar con profundidades de corte y avances altos, que tienden a incrementar las fuerzas resultantes a medida que se incrementa la velocidad de giro de husillo.
- Adicionalmente se puede establecer que los parámetros de corte recomendados para la fabricación de micro-componentes oftalmológicos en PMMA biocompatibles, corresponden a la velocidad de giro de 45 000 rpm, avance de 10 μm /diente y una profundidad de 80 μm . Bajo esta combinación de parámetros se obtiene la menor cantidad y tamaño de rebabas en los bordes de las piezas fabricadas y la rugosidad superficial de la pieza se encuentra en un valor aceptable; reduciendo la cantidad de post-procesos y el tiempo empleado para estos.
- Las micro-herramientas aquí estudiadas presentan una carga de rotura cercana a 1 N, razón por la cual deben evitarse condiciones de procesamiento que produzcan niveles cercanos a este límite. En este trabajo esas condiciones fueron superadas en el experimento ap160-fz10-S60 en el que se presentó fractura de la fresa.
- La generación excesiva de rebaba puede también ser un indicador de la proximidad a la rotura de la microherramienta, tal como se evidenció en las combinaciones ap160-fz05-S30, ap-160-fz10-S75 en las que se generaron grandes cantidades de rebaba y cuyas fuerzas netas alcanzaron valores cercanos a 1N. De haberse continuado el proceso de corte con estas condiciones, la herramienta habría fallado rápidamente.

TRABAJOS FUTUROS

- Para estudios posteriores en este tema, se recomienda incluir en el modelo de predicción de fuerzas de corte, efectos del '*run-out*' y deflexión de la herramienta; además de la generación del espesor mínimo de viruta.
- Trabajar la modelación numérica del proceso de corte de polímeros con la cual se podría comparar los resultados experimentales, incluyendo la predicción de fuerzas y un análisis de temperatura.
- El análisis específico de chatter no se encuentra dentro del alcance de este trabajo por lo tanto se presenta como recomendación para trabajos futuros. Por esta razón se recomienda ejecutar un juego adicional de experimentos con las mismas combinaciones de parámetros. Esta vez empleando acelerómetros y sistemas de sincronización con el husillo que permitan identificar la presencia de chatter y chatter de doble periodo.
- Con el propósito de desarrollar un modelo más completo, en el mecanizado de experimentación se puede dejar una saliente a la probeta. Ésta tendrá la profundidad de pasada radial a_e de los ensayos. Por lo tanto, en cada probeta se tendrían cuatro caras en total, 2 para '*up-milling*' y 2 para '*down-milling*'. Lo que permitiría analizar los efectos de los parámetros de corte de acuerdo al sentido de corte de la herramienta. Adicionalmente, se podría medir la rugosidad en las paredes verticales y no solo en el piso de las ranuras.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] S. Filiz, L. Xie, L. E. Weiss, and O. B. Ozdoganlar, "Micromilling of microbarbs for medical implants," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 3–4, pp. 459–472, Mar. 2008.
- [2] I. Tansel, O. Rodriguez, M. Trujillo, E. Paz, and W. Li, "Micro-end-milling-I. Wear and breakage," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 1419–1436, 1998.
- [3] H. Cáceres, L. Hernández, A. Suárez, J. Labarga, and P. Rodríguez, "Microfresado de Aceros." CNIM XVI, León, 2004.
- [4] I. Tansel, M. Trujillo, A. Nedbouyan, C. Velez, W.-Y. Bao, T. Arkan, and B. Tansel, "Micro-end-milling—III. Wear estimation and tool breakage detection using acoustic emission signals," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 1449–1466, 1998.
- [5] W. Lang, "Reflexions on the future of microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 72, no. 1, pp. 1–15, Jan. 1999.
- [6] G. Byrne, "The Technological Future. Cutting Technology," 2006.
- [7] T. Masuzawa, "State of the Art of Micromachining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, 2000.
- [8] J. P. Davim and M. J. Jackson, *Nano and Micromachining*, First Edit. Hoboken: Wiley, 2009, p. 207.
- [9] Makino, "Trends in micromachining technologies." [Online]. Available: [http://www.makino.com/about/article/2-1-2008/Trends in Micro Machining Technologies](http://www.makino.com/about/article/2-1-2008/Trends%20in%20Micro%20Machining%20Technologies). [Accessed: 08-Feb-2010].
- [10] G. Zurek, "Re-defining Precision," *MoldMaking Techonology*, 2008. [Online]. Available: <http://www.moldmakingtechnology.com/articles/re-defining-precision>. [Accessed: 15-Feb-2010].
- [11] J. Taylor, "The tool wear-time relationship in metal cutting," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 2, pp. 119–152, 1962.
- [12] F. Faura and M. A. Sebastian, "Análisis de los modelos de desgaste de herramientas en procesos de mecanizado," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 1, no. 1, pp. 81–93, 1997.

- [13] L. Uriarte, A. Herrero, A. Ivanov, H. Oosterling, L. Staemmler, P. T. Tang, and D. Allen, "Comparison between microfabrication technologies for metal tooling," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 220, no. 11, pp. 1665–1676, Jan. 2006.
- [14] M. Malekian, M. G. Mostofa, S. S. Park, and M. B. G. Jun, "Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 553–559, Mar. 2012.
- [15] M. Madou, "Fundamentals of Microfabrication." UC Irvine, 2009.
- [16] M. C. Shaw, "Precision Finishing*," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 1–348, Jan. 1995.
- [17] L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez, and A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento*, Primera ed. Bilbao: Ediciones Técnicas Izaro, 2004, p. 334.
- [18] L. Uriarte, A. Herrero, A. Ivanov, H. Oosterling, L. Staemmler, P. T. Tang, and D. Allen, "Comparison between microfabrication technologies for metal tooling," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 220, no. 11, pp. 1665–1676, 2006.
- [19] L. Uriarte, A. Herrero, M. Zatarain, G. Santiso, L. N. López de Lacalle, A. Lamikiz, and J. Albizuri, "Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3mm in diameter," *Precision Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2007.
- [20] J. Mecomber, D. Hurd, and P. Limbach, "Enhanced machining of micron-scale features in microchip molding masters by CNC milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 12–13, pp. 1542–1550, 2005.
- [21] L. G. Uriarte Ibarrola, "Desarrollo de una metodología para la reducción de errores en el microfresado de moldes," Universidad del País Vasco, 2007.
- [22] S. Dimov, D. T. Pham, A. Ivanov, K. Popov, and K. Fansen, "Micromilling strategies: Optimization issues," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 218, no. 7, pp. 731–736, 2004.
- [23] Escuela Politécnica Superior and MicroManufacturing, "Microtecnologías: Pasado, Presente y Futuro." MicroManufacturing, Mondragon, p. 40, 2007.

- [24] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication*, First. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004, p. 422.
- [25] E. Gandarias, "MICROM: A revolutionary monitoring system to detect tool breakages & collisions, enhance machine cycles and introduce a new probing concept in micromilling," Mondragon Unibertsitatea, 2007.
- [26] E. Gandarias, P. J. Arrazola Arriola, I. Gallego, P. Aristimuño, and R. Lizarralde, "Detección de rotura de herramientas en el microfresado mediante nuevos sistemas de monitorizado," *IMHE: Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios*, pp. 63–85, 2007.
- [27] KERN Micro- und Feinwerktechnik GmbH & Co. KG, "KERN Evo Ultra Precision CNC Machining Centre." [Online]. Available: http://www.kern-microtechnik.com/upload/media/kern_evo_e.pdf. [Accessed: 25-Jul-2011].
- [28] P. Cardoso and J. P. Davim, "A BRIEF REVIEW ON MICROMACHINING OF MATERIALS," *Reviews on advanced materials science*, vol. 30, pp. 98–102, 2012.
- [29] L. N. López de Lacalle, *Mecanizado de alto rendimiento: procesos de Arranque*. Ediciones Técnicas Izaro, 2004, p. 334.
- [30] Dixi Polytool, "Dixi Polytool Catalogue - Milling." p. 112, 2011.
- [31] J. Yan, K. Uchida, N. Yoshihara, and T. Kuriyagawa, "Fabrication of micro end mills by wire EDM and some micro cutting tests," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 2, p. 025004, Feb. 2009.
- [32] M. J. Vasile, C. R. Friedrich, B. Kikkeri, and R. Mceihannon, "Micrometer-scale machining□: tool fabrication and initial results," *Precision Engineering*, vol. 19, no. 2/3, pp. 180–186, 1996.
- [33] Proyecto Singular y de Carácter Estrategico de la Unión Europea, "Aplicaciones de Microfabricación," *MicroManufacturing*. [Online]. Available: http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es. [Accessed: 04-Jun-2012].
- [34] A. Otieno, C. Pedapati, X. Wan, and H. Zhang, "Imaging and Wear Analysis of Micro-tools Using Machine Vision," in *Proceedings of the 2006 IJME*, 2006, p. 9.

- [35] A. R. Zareena and S. C. Veldhuis, "Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 560–570, Mar. 2012.
- [36] J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 3–4, pp. 313–332, Mar. 2006.
- [37] J. Chae and S. S. Park, "High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 9, pp. 1433–1441, Jul. 2007.
- [38] J. R. Mayor and A. A. Sodemann, "An Investigation of Scale Effects on Process Planning for High-Speed High-Precision Micromachining Operations," in *2nd International Conference on Micromanufacturing*, 2007, pp. 1–6.
- [39] C.-J. Kim, J. R. Mayor, and J. Ni, "A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 4, p. 710, 2004.
- [40] T. Miyaguchi, M. Masuda, E. Takeoka, and H. Iwabe, "Effect of tool stiffness upon tool wear in high spindle speed milling using small ball end mill," *Precision Engineering*, no. 25, pp. 145–154, 2001.
- [41] N. del C. Marín Calvo, "Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidable austeníticos," Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [42] M. Correa, M. de J. Ramírez, J. R. Alique, and C. A. Rodríguez, "Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: técnicas de análisis y modelos," *Comité Español de Automática*, p. 8.
- [43] F. Vollertsen, Z. Hu, H. S. Niehoff, and C. Theiler, "State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 151, no. 1–3, pp. 70–79, Sep. 2004.
- [44] P. Portugal, "Desgaste y vida de las herramientas de corte." 2004.
- [45] I. N. Tansel, T. . Arkan, W. Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, and M. McCool, "Tool wear estimation in micro-machining. Part II□: neural-network-based periodic inspector for non- metals," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 609–620, 2000.

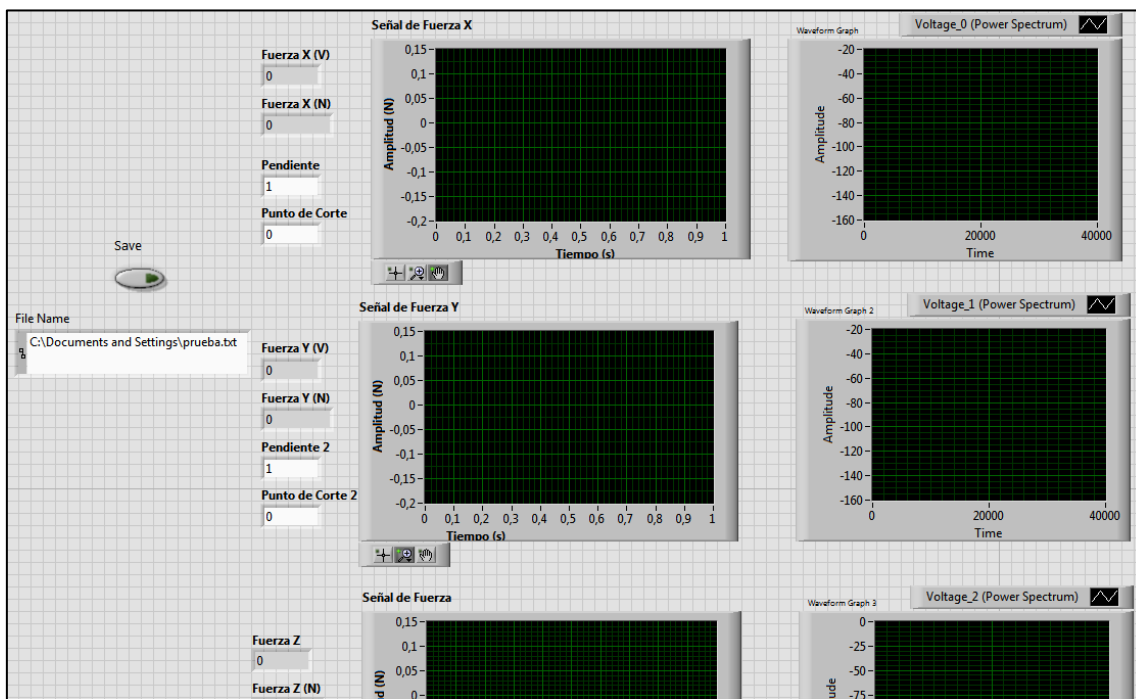
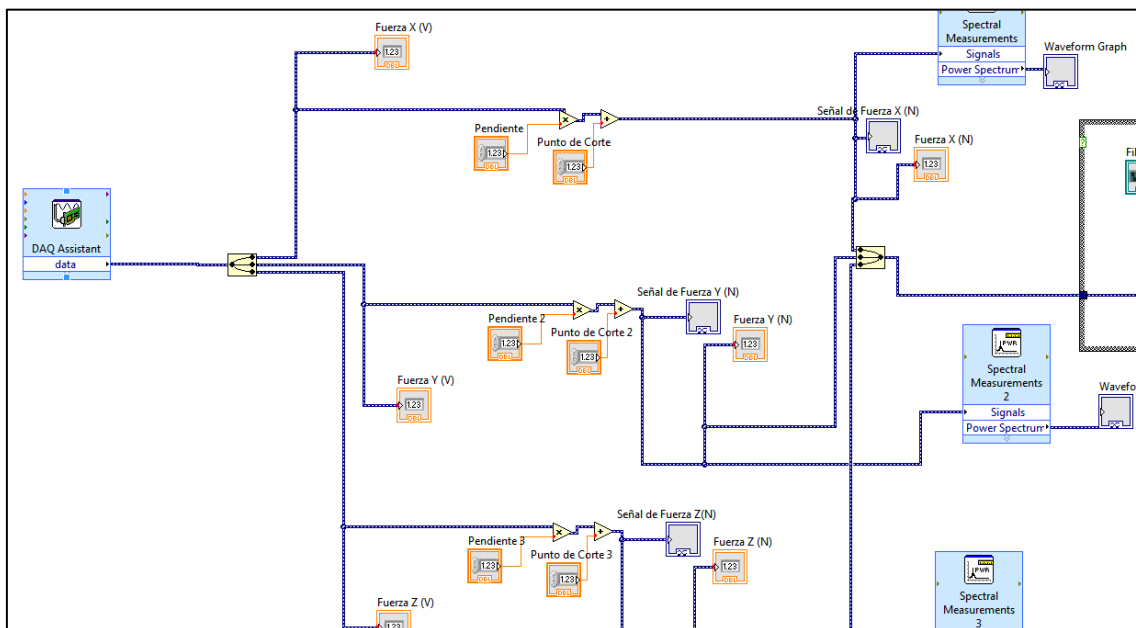
- [46] I. Tansel, A. Nedbouyan, M. Trujillo, and B. Tansel, "Micro-end-milling-II. Extending tool life with a Smart Workpiece Holder (SWH)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 1437–1448, 1998.
- [47] X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, and K. F. Ehmann, "The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 4, p. 666, 2004.
- [48] H. Ding, N. Shen, and Y. C. Shin, "Experimental Evaluation and Modeling Analysis of Micromilling of Hardened H13 Tool Steels," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, no. 4, p. 11, 2011.
- [49] Ideko, "Mecanizado de PMMA," 2010.
- [50] R. E. Haber, J. E. Jiménez, and J. J. López-coronado, "Modelo matemático para la predicción del esfuerzo de corte en el mecanizado a alta velocidad," *Revista de Metalurgia*, vol. 40, pp. 247–258, 2004.
- [51] L. Uriarte, A. Herrero, L. N. Lopez de Lacalle, and A. Lamikiz, "Mechanistic modelling of the micro end milling operation," *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, vol. 222, pp. 23–34, 2007.
- [52] L. Uriarte, S. Azcárate, A. Herrero, L. N. L. de Lacalle, and A. Lamikiz, "Mechanistic Modelling of the Micro End Milling Operation," in *Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, 2006, pp. 237–240.
- [53] J.-D. Kim and D. S. Kim, "Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 49, no. 3–4, pp. 387–398, Feb. 1995.
- [54] M. Malekian, S. S. Park, and M. B. G. Jun, "Modeling of dynamic micro-milling cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 7–8, pp. 586–598, Jun. 2009.
- [55] X. Jin and Y. Altintas, "Prediction of micro-milling forces with finite element method," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 3, pp. 542–552, Mar. 2012.
- [56] W. Y. Bao and I. N. Tansel, "Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, no. 15, pp. 2155–2173, Dec. 2000.

- [57] S. S. Park and M. Malekian, "Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 49–52, Jan. 2009.
- [58] Y. Altintas and X. Jin, "Mechanics of micro-milling with round edge tools," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 77–80, Jan. 2011.
- [59] Kyocera Micro Tools, "2011 SOLID CARBIDE MICRO DIAMETER CUTTING TOOLS." p. 108, 2011.
- [60] Departamento de Macromoléculas, "PMMA - Polimetacrilato de metilo," *Universidad de Valladolid*, 2004. [Online]. Available: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso03-04/PMAM/PMMA.htm>. [Accessed: 25-May-2012].
- [61] J. Pacheco, "Post-Procesador V1.1." Barranquilla, 2011.
- [62] Ideko - IK4, "Specifications of micro-milling machine demonstrator IK MILL." p. 2, 2012.
- [63] Kistler, "MiniDyn Multicomponent Dynamometer up to 250 N Type 9256C." Winterthur, p. 43, 2010.
- [64] Kistler, "Charge Amplifier Type 5080A." Winterthur, p. 116, 2010.
- [65] National Instruments, "NI USB-6259 BNC," *On line Catalogue*, 2012. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209150>. [Accessed: 26-May-2012].
- [66] CERN and KERN, "KERN and CERN - an exciting double act," *CMM Europe*, vol. 5, no. 1, pp. 31–37, 2012.
- [67] D. T. Pham, E. E. Eldukhri, and A. J. Soroka, "Innovative Production Machines and Systems," in *Fifth I*PROMS Virtual Conference*, 2009, no. July, p. 471.
- [68] Tesa-reflex Vista, "Application software for vision machines." pp. 1–62.
- [69] Agilent Technologies, "Atomic Force Microscopy - What is it?," 2012. [Online]. Available: <http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jsp?cc=MX&lc=spa&ckey=1774141&nid=-33986.0.02&id=1774141>. [Accessed: 17-Jun-2012].

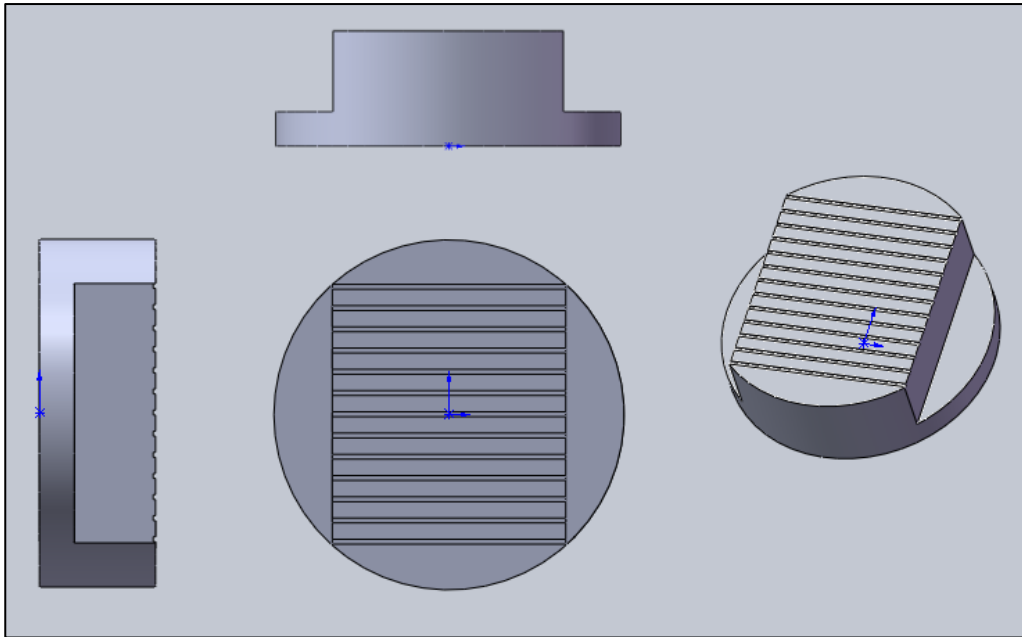
- [70] Nanosurf, “easyScan 2 FlexAFM V2.2.” Nanosurf, Switzerland, p. 254, 2010.
- [71] Sensofar, “Neox. 3D Optical Profiler,” *Online Catalogue*, 2012. [Online]. Available: http://www.sensofar.com/products/products_neox.html. [Accessed: 26-Jul-2012].
- [72] D. Burton, G. S. Duncan, J. C. Ziegert, and T. L. Schmitz, “High Frequency , Low Force Dynamometer for Micro-Milling Force Measurement,” *American Society for Precision Engineering*. ASPE Proceedings, Orlando, p. Poster, 2004.
- [73] NanoWorld Innovative Technologies, “NanoWorld AFM Probes Brochure.” [Online]. Available: <http://www.nanoworld.com/pointprobe-tapping-mode-reflex-coated-afm-tip-nclr>. [Accessed: 15-Jul-2012].
- [74] M. Bigerelle, a Gautier, and a Iost, “Roughness characteristic length scales of micro-machined surfaces: A multi-scale modelling,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 126, no. 1, pp. 126–137, Sep. 2007.
- [75] H. W. Coleman and W. G. Steele Jr, *Experimentation and uncertainty analysis for engineers*. Mississippi: John Wiley & Sons Ltd, 1989, p. 205.
- [76] S. Magis, “Prealistamiento en máquinas tipo suizo: A medida que la tecnología avanza, el mecanizado y herramental de precisión se vuelven más necesarios,” *Metalmecánica*, Apr-2012.
- [77] J. Pacheco, “Modelo caracterización herramientas frontales_v0.” Universidad del Norte, Barranquilla, 2011.
- [78] J. Pacheco, “Cálculo coeficientes de corte.” Barranquilla, 2007.
- [79] J. Pacheco, “forces_frontal.m.” Barranquilla, 2007.
- [80] J. Pacheco, “analisis_fourier.m.” Barranquilla, 2007.

APÉNDICES

Apéndice A. Imagen parcial de la interfaz para adquisición de datos en LabVIEW



Apéndice B.1 CAD de disco para pruebas (vistas)



Apéndice B.2 Código H para ranuras de 200 micras

```

0 BEGIN PGM CORRIDA Tesis Y MM
1 ; PMMAR_15X5_HTA200
2 ; G-Coded: 04-MAY-2012 @ 18:20
3 ; H code generator V1.1 by J. Pacheco
4 ; COPYRIGHT 2011
5 ; [...] !
6 ; -----TOOLING INFO-----
7 BLK FORM 0.1 Z X-7,5 Y-7,5 Z-5
8 BLK FORM 0.2 X+7,5 Y+7,5 Z+0
9 ; TOOL #: 23 - Kyocera
10 ; DIA: 0.200 - INSERT RADIUS:
0.000
11 ; [...] !
12 ; [...] !
13 ;
14 ; ***** TOOL CHANGE *****
15 TOOL CALL 23 Z S45000
16 ; Kyocera
17 ;
18 ; TOOL MEASUREMENT
19 M3
20 CYCL DEF 9.0 TIEMPO ESPERA
21 CYCL DEF 9.1 T.ESPR120
22 TCH PROBE 584
LONGITUD/RADIO HERR. ~
Q350=+0 ;TIPO DE MEDICION ~
Q351=+0 ;ALCANCE DE
MEDICION ~
Q352=+0 ;CONTROLE DE CORTE
~
Q355=-2 ;POSICIÓN QUE MIDE ~
Q361=+3 ;NO DE MEDICIONES ~
Q362=+0,003 ;DISTORSION
PERMITIDO ~
Q359=+0
;CORR.SUPLEM.LONGITUD ~
Q360=+0 ;CORR.SUPLEM.RADIO
23 ; [...] !
24 ; MAIN HOME - TOP DATUM
25 ;*** F-contour ***
26 M3
27 M510

```

28 L X-5 Y-5,44 F800
 29 L Z+2 F800
 30 L Z-0,16 R0 F300
 31 L X+5 R0 F450
 32 L Z+2 F800
 33 L X-5 Y-4,53 F800
 34 L Z-0,16 R0 F300
 35 L X+5 R0 F450
 36 L Z+2 F800
 37 L X-5 Y-3,62 F800
 38 L Z-0,16 R0 F300
 39 L X+5 R0 F450
 40 L Z+2 F800
 41 L X-5 Y-2,71 F800
 42 L Z-0,16 R0 F300
 43 L X+5 R0 F450
 44 L Z+2 F800
 45 L X-5 Y-1,8 F800
 46 L Z-0,16 R0 F300
 47 L X+5 R0 F450
 48 L Z+2 F800
 49 L X-5 Y-0,89 F800
 50 L Z-0,16 R0 F300
 51 L X+5 R0 F450
 52 L Z+2 F800
 53 L X-5 Y+0,02 F800
 54 L Z-0,16 R0 F300
 55 L X+5 R0 F450

56 L Z+2 F800
 57 L X-5 Y+0,93 F800
 58 L Z-0,16 R0 F300
 59 L X+5 R0 F450
 60 L Z+2 F800
 61 L X-5 Y+1,84 F800
 62 L Z-0,16 R0 F300
 63 L X+5 R0 F450
 64 L Z+2 F800
 65 L X-5 Y+2,75 F800
 66 L Z-0,16 R0 F300
 67 L X+5 R0 F450
 68 L Z+2 F800
 69 L X-5 Y+3,66 F800
 70 L Z-0,16 R0 F300
 71 L X+5 R0 F450
 72 L Z+2 F800
 73 L X-5 Y+4,57 F800
 74 L Z-0,16 R0 F300
 75 L X+5 R0 F450
 76 L Z+2 F800
 77 L X-5 Y+5,48 F800
 78 L Z-0,16 R0 F300
 79 L X+5 R0 F450
 80 L Z+100 F800
 81 M511
 82 M30
 83 END PGM CORRIDA TesisY MM

Apéndice C. Código H para contorno del disco

0 BEGIN PGM	32 L Y+5.5900 R0 F450
CONTORNO_DISCO_TESIS MM	33 L Z+2.0000 FMAX
1 ; PMMAR_15X5_HTA300	34 L Y-5.5900 FMAX
2 ; G-Coded: 06-FEB-2012 @ 10:22	35 L Z+1.0000 FMAX
3 ; H code generator V1.1 by J. Pacheco	36 L Z-1.5000 R0 F300
4 ; COPYRIGHT 2011	37 L Y+5.5900 R0 F450
5	38 L Z+2.0000 FMAX
6 ; ----TOOLING INFO----	39 L Y-5.5900 FMAX
7 BLK FORM 0.1 Z X-7.5 Y-7.5 Z-5	40 L Z+0.5000 FMAX
8 BLK FORM 0.2 X+7.5 Y+7.5 Z+0.0000	41 L Z-2.0000 R0 F300
9 ; TOOL #: 1 - DIXI 1003.217	42 L Y+5.5900 R0 F450
10 ; DIA: 2.000 - INSERT RADIUS:	43 L Z+2.0000 FMAX
0.000	44 L Y-5.5900 FMAX
11 ;	45 L Z+0.0000 FMAX
12 ; ***** TOOL CHANGE *****	46 L Z-2.5000 R0 F300
13 TOOL CALL 8 Z S10000	47 L Y+5.5900 R0 F450
14 ; Dixi 1003.217	48 L Z+2.0000 FMAX
15 ;	49 L Y-5.5900 FMAX
16 ; TOOL MEASUREMENT	50 L Z-0.5000 FMAX
17 M3	51 L Z-3.0000 R0 F300
18 CYCL DEF 9.0 TIEMPO ESPERA	52 L Y+5.5900 R0 F450
19 CYCL DEF 9.1 T.ESPR120	53 L Z+2.0000 FMAX
20 TCH PROBE 584	54 L Y-5.5900 FMAX
LONGITUD/RADIO HERR. ~	55 L Z-1.0000 FMAX
Q350=+0 ;TIPO DE MEDICION ~	56 L Z-3.5000 R0 F300
Q351=+0 ;ALCANCE DE	57 L Y+5.5900 R0 F450
MEDICION ~	58 L Z+2.0000 FMAX
Q352=+0 ;CONTROLE DE CORTE ~	59 L Y-5.5900 FMAX
Q355=-2 ;POSICIÓN QUE MIDE ~	60 L Z-3.5000 R0 F300
Q361=+3 ;NO DE MEDICIONES ~	61 L Y+5.5900 R0 F450
Q362=+0,003 ;DISTORSION	62 L Z+2.0000 FMAX
PERMITIDO ~	63 L X-6.0000 FMAX
Q359=+0	64 L Z-0.5000 R0 F300
;CORR.SUPLEM.LONGITUD ~	65 L Y-5.5900 R0 F450
Q360=+0 ;CORR.SUPLEM.RADIO	66 L Z+2.0000 FMAX
21 ; MAIN HOME - TOP DATUM	67 L Y+5.5900 FMAX
22 ;*** F-contour2 ***	68 L Z+1.5000 FMAX
23 M3	69 L Z-1.0000 R0 F300
24 L X+6.0000 Y-5.5900 FMAX	70 L Y-5.5900 R0 F450
25 L Z+2.0000 FMAX	71 L Z+2.0000 FMAX
26 L Z-0.5000 R0 F300	72 L Y+5.5900 FMAX
27 L Y+5.5900 R0 F450	73 L Z+1.0000 FMAX
28 L Z+2.0000 FMAX	74 L Z-1.5000 R0 F300
29 L Y-5.5900 FMAX	75 L Y-5.5900 R0 F450
30 L Z+1.5000 FMAX	76 L Z+2.0000 FMAX
31 L Z-1.0000 R0 F300	77 L Y+5.5900 FMAX

78 L Z+0.5000 FMAX
79 L Z-2.0000 R0 F300
80 L Y-5.5900 R0 F450
81 L Z+2.0000 FMAX
82 L Y+5.5900 FMAX
83 L Z+0.0000 FMAX
84 L Z-2.5000 R0 F300
85 L Y-5.5900 R0 F450
86 L Z+2.0000 FMAX
87 L Y+5.5900 FMAX
88 L Z-0.5000 FMAX
89 L Z-3.0000 R0 F300
90 L Y-5.5900 R0 F450

91 L Z+2.0000 FMAX
92 L Y+5.5900 FMAX
93 L Z-1.0000 FMAX
94 L Z-3.5000 R0 F300
95 L Y-5.5900 R0 F450
96 L Z+2.0000 FMAX
97 L Y+5.5900 FMAX
98 L Z-3.5000 R0 F300
99 L Y-5.5900 R0 F450
100 L Z+2.0000 FMAX
101 M30
102 END PGM
CONTORNO_DISCO_TESIS MM

Apéndice D. Código H para realizar el desbaste del disco ranurado

```
0 BEGIN PGM desbaste MM
1 BLK FORM 0.1 Z X-8 Y-8 Z-5
2 BLK FORM 0.2 X+8 Y+8 Z+0
3 TOOL CALL 8 Z S10000
4 M3
5 CYCL DEF 9.0 TIEMPO ESPERA
6 CYCL DEF 9.1 T.ESPR120
7 TCH PROBE 584 LONGITUD/RADIO HERR. ~
  Q350=+0 ;TIPO DE MEDICION ~
  Q351=+0 ;ALCANCE DE MEDICION ~
  Q352=+0 ;CONTROLE DE CORTE ~
  Q355=-2 ;POSICIÓN QUE MIDE ~
  Q361=+3 ;NO DE MEDICIONES ~
  Q362=+0,003 ;DISTORSION PERMITIDO ~
  Q359=+0 ;CORR.SUPLEM.LONGITUD ~
  Q360=+0 ;CORR.SUPLEM.RADIO
8 L X+0 Y+0 FMAX
9 L Z+100 FMAX
10 M510
11 CYCL DEF 252 CAJERA CIRCULAR ~
  Q215=+0 ;TIPO MECANIZADO ~
  Q223=+17 ;DIAMETRO CIRCULO ~
  Q368=+0 ;SOBREMEDIDA LATERAL ~
  Q207=+350 ;AVANCE FRESADO ~
  Q351=+1 ;TIPO DE FRESADO ~
  Q201=-0,2 ;PROFUNDIDAD ~
  Q202=+0,1 ;PASO PROFUNDIZACION ~
  Q369=+0 ;SOBREMEDIDA PROFUND. ~
  Q206=+150 ;AVANCE PROFUNDIDAD ~
  Q338=+0 ;PASADA PARA ACABADO ~
  Q200=+2 ;DISTANCIA SEGURIDAD ~
  Q203=+0 ;COORD. SUPERFICIE ~
  Q204=+50 ;2A DIST. SEGURIDAD ~
  Q370=+0,5 ;SOLAPAM. TRAYECTORIA ~
  Q366=+1 ;PUNZONAR ~
  Q385=+500 ;AVANCE ACABADO
12 L X+0 Y+0 M99
13 L Z+100 FMAX
14 M511
15 M30
16 END PGM desbaste MM
```

8 ranuras de 3.2 mm
Las ranuras y perfil
de la placa superior
fabrican mediante
mecanizado.

8 INGENIERIA CAD. Todas las líneas
CONTRUCCION son de 5 mm de
COTAS SE espesor
EXPRESAN EN MM

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR
1	BASE	PC	1	1.00
2	PLACA	PC	1	1.00
3	PLACA	PC	1	1.00
4	PLACA	PC	1	1.00
5	PLACA	PC	1	1.00
6	PLACA	PC	1	1.00
7	PLACA	PC	1	1.00
8	PLACA	PC	1	1.00
9	PLACA	PC	1	1.00
10	PLACA	PC	1	1.00
11	PLACA	PC	1	1.00
12	PLACA	PC	1	1.00
13	PLACA	PC	1	1.00
14	PLACA	PC	1	1.00
15	PLACA	PC	1	1.00
16	PLACA	PC	1	1.00
17	PLACA	PC	1	1.00
18	PLACA	PC	1	1.00
19	PLACA	PC	1	1.00
20	PLACA	PC	1	1.00
21	PLACA	PC	1	1.00
22	PLACA	PC	1	1.00
23	PLACA	PC	1	1.00
24	PLACA	PC	1	1.00
25	PLACA	PC	1	1.00
26	PLACA	PC	1	1.00
27	PLACA	PC	1	1.00
28	PLACA	PC	1	1.00
29	PLACA	PC	1	1.00
30	PLACA	PC	1	1.00
31	PLACA	PC	1	1.00
32	PLACA	PC	1	1.00
33	PLACA	PC	1	1.00
34	PLACA	PC	1	1.00
35	PLACA	PC	1	1.00
36	PLACA	PC	1	1.00
37	PLACA	PC	1	1.00
38	PLACA	PC	1	1.00
39	PLACA	PC	1	1.00
40	PLACA	PC	1	1.00
41	PLACA	PC	1	1.00
42	PLACA	PC	1	1.00
43	PLACA	PC	1	1.00
44	PLACA	PC	1	1.00
45	PLACA	PC	1	1.00
46	PLACA	PC	1	1.00
47	PLACA	PC	1	1.00
48	PLACA	PC	1	1.00
49	PLACA	PC	1	1.00
50	PLACA	PC	1	1.00
51	PLACA	PC	1	1.00
52	PLACA	PC	1	1.00
53	PLACA	PC	1	1.00
54	PLACA	PC	1	1.00
55	PLACA	PC	1	1.00
56	PLACA	PC	1	1.00
57	PLACA	PC	1	1.00
58	PLACA	PC	1	1.00
59	PLACA	PC	1	1.00
60	PLACA	PC	1	1.00
61	PLACA	PC	1	1.00
62	PLACA	PC	1	1.00
63	PLACA	PC	1	1.00
64	PLACA	PC	1	1.00
65	PLACA	PC	1	1.00
66	PLACA	PC	1	1.00
67	PLACA	PC	1	1.00
68	PLACA	PC	1	1.00
69	PLACA	PC	1	1.00
70	PLACA	PC	1	1.00
71	PLACA	PC	1	1.00
72	PLACA	PC	1	1.00
73	PLACA	PC	1	1.00
74	PLACA	PC	1	1.00
75	PLACA	PC	1	1.00
76	PLACA	PC	1	1.00
77	PLACA	PC	1	1.00
78	PLACA	PC	1	1.00
79	PLACA	PC	1	1.00
80	PLACA	PC	1	1.00
81	PLACA	PC	1	1.00
82	PLACA	PC		

#	x	ACTIVIDAD	COMENTARIO
1		Ajustar temperatura	Aire acondicionado en 20 °C
2		Ajustar humedad	Deshumidificador en 45% - 55 %
3		Encender maquina	Seguir protocolo de encendido
4		Calentar husillo	Correr programa calentamiento
5		Preparar herramienta	Cono + tuerca. Torque 10 Nm
6		Medir manualmente longitud herramienta	
7		Montar herramienta en magazín	Verificar posición
8		Crear herramienta en tabla de	Ingresar manualmente L, R, filos, TTL-offset,

		herramientas	TTR-offset
9		Verificar herramientas para contorno, desbaste y ranuras	Existencia y estado
10		Cargar programa <i>Contorno disco</i>	
11		Editar programa <i>Contorno disco</i>	Verificar herramienta, posición, variables
12		Cargar programa <i>Desbaste disco</i>	
13		Editar programa <i>Desbaste disco</i>	Verificar herramienta, posición, variables
14		Cargar programa <i>CorridaTesisYy</i>	
15		Editar programa <i>CorridaTesisYy</i>	Verificar herramienta, posición, variables
*		Modificar TOOL CALL	Posición de la herramienta en el magazín
*		Modificar N (rpm)	Valor s/n corrida
*		Modificar ap (mm)	Valor s/n corrida. Niveles de Z negativos para profundidad de ranura
*		Modificar Fxy (mm/min)	Valor s/n corrida
16		Desarrollo test programa <i>CorridaTesisYy</i>	
17		Alistar disco de pmma	
*		Preparar placa dinamómetro	Limpiar y eliminar restos de cera de bloqueo
*		Calentar pistola para cera de bloqueo	Verificar primero si debe llenarse
*		Fijar disco de PMMA a la placa del dinamómetro	Encender aire comprimido para acelerar el secado
18		Preparar microscopio portátil	Ubicar, enfocar y abrir aplicación del microscopio
19		Posicionar boquilla refrigeración	Espacio suficiente para palpador y desplazamientos
20		Llamar palpador	Entorno MDI
21		Determinar desviación de pieza en nivel z	Fijar punto referencia Z, tomar dos puntos adicionales
*		Realizar planeado en el disco	En caso de superar la desviación máxima permitida
22		Determinar centro de pieza	Fijar puntos de referencia X y Y
23		Verificar %F en 100	Mirar diales
24		Verificar %S en 100	Mirar diales
25		Correr programa <i>ContornoDisco</i>	Acomodar manguera de refrigeración por aire
26		Encender computador	
27		Conectar tarjeta al computador	
28		Encender amplificador	
*		Verificar voltaje y carga	En los tres canales. Bloque Data
29		Encender tarjeta	
30		Cargar programa de LabVIEW	
*		Verificar continuos samples: frecuencia 75kHz - Nsamples75K	En los tres canales. Diagrama de bloques: Data acquisition
*		Verificar time out: -1	En los tres canales. Diagrama de bloques: Data acquisition
*		Seleccionar carpeta y archivo de destino	Diagrama de bloques: Data save
*		Copiar dirección carpeta y archivo destino	Entorno gráfico. Espacio en blanco, abajo del botón "save"
*		Cambiar valores de pendiente	Entorno gráfico. Junto a cada gráfica de fuerza. Valor: 0,2
31		Llamar herramienta para ranurado	
32		Llamar programa <i>CorridaTesisYy</i>	
33		Correr programa <i>CorridaTesisYy</i>	
*		Activar "measure" del amplificador	Presionar botón verde

*		Dar "play" en entorno gráfico	Cuando la herramienta comienza a bajar hacia el disco
*		Dar "save" en entorno gráfico	Cuando la herramienta comienza a bajar hacia el disco
34		Finalizar programa CorridaTesisYy	
*		Detener "save" en entorno gráfico	Cuando la herramienta termina de ranurar
*		Detener "play" en entorno gráfico	Cuando la herramienta termina de ranurar
*		Desactivar "measure" del amplificador	
35		Verificar almacenamiento de datos	En carpeta de destino
36		Tomar datos de L y R medidos por el láser	En tabla de herramientas
37		Correr programa Tesis_Desbaste	
38		Llamar palpador	
39		Establecer nuevo cero en Z	Fijar punto de referencia
40		Llamar herramienta para ranurado	
41		Repetir a partir del paso 30	Hasta completar las pasadas requeridas
42		Medir longitud y radio de herramienta en última pasada	
*		Activar modo "ejecución frase a frase"	Para programa CorridaTesisYy
*		Ejecutar líneas de medición	
*		Tomar datos de L y R medidos por el láser	En tabla de herramientas
43		Indicar inicio de ranuras	Punto con marcador rojo
44		Desmontar y almacenar disco ranurado	Etiquetar con nombre, número corrida, fecha

Apéndice G. Lista de chequeo para inspección de herramientas

#	x	ACTIVIDAD	COMENTARIO
1		Encender microscopio	Procedimiento encendido de: Computador + microscopio Desplazar hasta que el sensor se active
2		Inicializar ejes del microscopio	
3		Instalar lente de 2X en microscopio	
4		Indicar al equipo el tipo de lente a utilizar	
*		Calibrar	
5		Posicionar herramientas a inspeccionar	

*		Ubicar herramienta en la base para microscopio	Emplear lupa para ubicar fillos
*		Posicionar pieza en X y Y	Mover mesa hasta ubicarla en rango de visión
*		Enfocar en Z	Usar avances y micro-avances
6		Configurar iluminación	Encender y llevar al máximo
*		Establecer niveles de luz difusa (verde)	Apagar
*		Establecer niveles de luz paralela (blanca)	Encender e ir subiendo para tomar imágenes detalladas de la herramienta
*		Establecer niveles de luz coaxial (segmentada)	Aumentar nivel con ícono de "lupa"
7		Aumentar la imagen	En zonas con acumulación de material
8		Tomar fotos detalladas	Convierte el microscopio en proyector de perfiles
9		Apagar luz coaxial	
10		Llevar aumentos al máximo	
11		Enfocar imagen en el filo de la herramienta	Filo superior
12		Seleccionar forma circular para medición	
13		Activar detector de perfiles	
*		Posicionar en centro de pantalla el borde de pieza	
14		Tocar 5 puntos cercanos al borde del filo	Dos antes, uno sobre y dos después del punto de inflexión del filo
*		Hacer esta operación 3 veces	Promediar los datos
15		Tomar lecturas de radios y tolerancias	
16		Tomar fotos del perfil	
17		Generar reporte de las mediciones	
18		Extraer archivos	
*		Copiar imágenes	En un medio externo (USB)
*		Copiar reportes	En un medio externo (USB)
19		Llevar aumentos al mínimo	
20		Ubicar siguiente herramienta para inspección	
21		Repetir a partir del paso 5	

Apéndice H. Lista de chequeo para inspección de discos ranurados

#	x	ACTIVIDAD	COMENTARIO
1		Encender microscopio	Procedimiento encendido de: Computador + microscopio
2		Inicializar ejes del microscopio	Desplazarlos hasta que el sensor se active
3		Instalar lente de 2X en microscopio	
4		Indicar al equipo el tipo de lente a utilizar	
*		Calibrar	
5		Posicionar disco a inspeccionar	Tener en cuenta la marca de inicio de

			ranuras
*		Ubicar disco en la base para microscopio	Emplear lupa para ubicar filos
*		Posicionar pieza en X y Y	Mover mesa hasta ubicarla en rango de visión
*		Enfocar en Z	Usar avances y micro-avances
6		Configurar iluminación	
*		Establecer niveles de luz difusa (verde)	Encender y llevar al máximo
*		Establecer niveles de luz paralela (blanca)	Apagar
*		Establecer niveles de luz coaxial (segmentada)	Encender e ir subiendo para tomar imágenes detalladas de las ranuras
7		Aumentar la imagen	Aumentar nivel con ícono de "lupa"
8		Tomar fotos detalladas	De ranuras y zonas con acumulación de viruta y rebaba
*		Inicio de ranura	Por grupos de ranuras
*		Mitad de ranura	Por grupos de ranuras
*		Fin de ranura	Por grupos de ranuras
9		Llevar aumentos al máximo	
10		Enfocar imagen en ranuras para medición	Primera, octava y última ranura
11		Seleccionar forma lineal para medición	
12		Activar detector de perfiles	
*		Posicionar en centro de pantalla el borde de pieza	
13		Tocar 3 puntos a cada lado de la ranura	En el INICIO de la ranura primera, octava y última
14		Medir distancia entre líneas	
15		Tomar lecturas de distancias y tolerancias	
16		Tocar 3 puntos a cada lado de la ranura	En el FINAL de la ranura primera, octava y última
17		Medir distancia entre líneas	
18		Tomar lecturas de distancias y tolerancias	
19		Generar reporte de las mediciones	
20		Extraer archivos	
*		Copiar imágenes	En un medio externo (USB)
*		Copiar reportes	En un medio externo (USB)
21		Llevar aumentos al mínimo	
22		Ubicar siguiente disco para inspección	
23		Repetir a partir del paso 5	